

Automation und Transition im Kraftfahrzeug

Nutzerzentrierte Gestaltung von Übergabe- und Übernahme-situationen  
innerhalb eines mehrstufigen Automationsansatzes

Von der Fakultät für Lebenswissenschaften

der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades

einer Doktorin der Naturwissenschaften

(Dr. rer. nat)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von Ina Petermann-Stock  
aus Lauchhammer

1. Referent:	Prof. Dr. Mark Vollrath
2. Referent:	Prof. Dr. Bernhard Schlag
eingereicht am:	03.06.2015
mündliche Prüfung (Disputation) am:	21.09.2015

Druckjahr 2015

## **Vorveröffentlichungen der Dissertation**

Teilergebnisse aus dieser Arbeit wurden mit Genehmigung der Fakultät für Lebenswissenschaften, vertreten durch den Mentor der Arbeit, in folgenden Beiträgen vorab veröffentlicht:

### **Publikationen**

Petermann, I. & Kiss, M. (2010). Die Rolle des Fahrers im Spektrum von Automation und Transition. ATZextra, 02 (Ausgabe 2010), 90-95.

Petermann, I. (2011). Evaluation of two different transition designs for Temporary Autopilot. In Schieben, A., Flemisch, F. (Eds.) HAVEit Deliverable D.33.6: Validation of Concept on Optimum Task Repartition (pp. 49-72). Confidential deliverable to the EU Commission, Brussels (2011). Verfügbar unter: [http://www.haveit-eu.org/LH2Uploads/ItemsContent/24/HAVEit\\_212154\\_D33.6\\_Public.pdf](http://www.haveit-eu.org/LH2Uploads/ItemsContent/24/HAVEit_212154_D33.6_Public.pdf) [18.12.2014].

### **Tagungsbeiträge**

Petermann, I. & Kiss, M. (2009). Die Rolle des Fahrers im Spektrum von Automation und Transition. Nutzerzentrierte Gestaltung von Übergabe- und Übernahmeprozessen zwischen Fahrer und drei aufeinander aufbauenden Automationsstufen. In VDI Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), Der Fahrer im 21. Jahrhundert (VDI-Berichte, Nr. 2085, S. 153-166). Düsseldorf: VDI-Verlag.

Petermann, I. & Schlag, B. (2010). Auswirkungen der Synthese von Assistenz und Automation auf das Fahrer-Fahrzeug-System. AAET 2010 – Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, 383-403.

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Abteilung „Fahrerarbeitsplatz“ der Volkswagen Konzernforschung. An dieser Stelle möchte ich denjenigen Personen danken, welche mich bei der Entstehung der Dissertation stets motiviert haben und durch ihr Engagement die Vollendung der Arbeit unterstützten.

An erster Stelle geht mein Dank an meinen Betreuer und Mentor Prof. Dr. Mark Vollrath, dessen konstruktive sowie motivierende Ratschläge mich inhaltlich, methodisch und auch persönlich bereichert haben. Gleichfalls danke ich Prof. Dr. Bernhard Schlag, der mir fachlich den Weg zur Promotion bereitete, stets an die Vollendung der Arbeit geglaubt und zu meiner Freude das Koreferat übernommen hat. Darüber hinaus danke ich herzlich Prof. Dr. Knut Baumann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein weiterer Dank gilt meinen früheren Vorgesetzten Dr. Miklós Kiss und Dr. Peter Oel, auf deren Initiative diese Arbeit beruht. Zudem förderten in gleicher Weise Dr. Helge Neuner und Lennart Bendewald die Fortführung der Dissertation, die im Lebensalltag zwischen Beruf, Familie und Gesundheit einige Hemmnisse mit sich brachte. Für die damit verbundenen Ratschläge, Freiräume und Einsichten danke ich euch sehr. Prof. Dr. Thomas Form, ihr Glaube und ihr dezentes Nachhaken haben mich darüber hinaus motiviert und persönlich gestärkt.

Ferner danke ich einer Vielzahl an Kollegen, ohne deren Unterstützung dieses Vorhaben nicht zu realisieren gewesen wäre: Eckhard Babbel, Gordon Seitz, Andreas Galla und Carsten Semmler - mit eurer technischen Kompetenz und Raffinesse war es mir möglich Simulatorstudien und Realfahrtversuche umzusetzen. Dr. Thomas Eigel, Dr. Frank Schroven, Dr. Linn Hackenberg und Dr. Andro Kleen - eure Motivation, kreativen Einfälle und ablenkenden Gespräche bleiben mir in wertvoller Erinnerung. Wolfgang Grundler und die Kollegen des Probandenpools - Danke für die organisatorische Unterstützung bei meinen Studien. Danke auch an eine Vielzahl weiterer Kollegen der Volkswagen Konzernforschung sowie der AUDI AG, die mich stets motivierend an die Vollendung der Arbeit erinnerten.

Besonders hervorheben möchte ich schließlich meine Familie, die mich durch ihre fortwährende Unterstützung erst in die Lage versetzt hat, mein Promotionsvorhaben abzuschließen. Lieber Gregor, lieber Philipp, ihr habt mir die Kraft und den Glauben für diese Arbeit gegeben. Ich bin sehr dankbar, dass ihr Bestandteil meines Lebens seid. Liebe Eltern, Schwiegereltern, liebe Schwester - Danke für eure stets aufmunternden Worte.

**Disclaimer**

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

### **Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der nutzerzentrierten Gestaltung von Übergabe- und Übernahme-situationen im Fahrkontext. Diese beziehen sich auf einen vierstufigen Automationsansatz, der sich vom (1) manuellen über das (2) assistierte, (3) teilautomatisierte bis hin zum (4) hochautomatisierten Fahren erstreckt. Im Kern der betrachteten Transitionen zwischen Fahrer und Automation stand die Frage, ob dem Fahrer zu jeder Zeit transparent ist, welcher Systemmodus gerade aktiv ist, was er genau tut und wie dessen Abhängigkeiten zu den anderen Fahrfunktionen definiert sind.

Das Augenmerk lag auf Übergangsszenarien, die mit Bezug zur Luftfahrtforschung mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem geminderten Systemmodusbewusstsein führen und nicht intendierte Effekte wie Modusverwechslungen oder Handlungsfehler im Modus forcieren. In dieser Arbeit waren sie durch unterschiedliche Grade der Kontrollverschiebung charakterisiert, gingen mit indirekten Transitionen auf Zwischenstufen der Automation einher, berücksichtigten einander funktional ähnliche Systemmodi und schlossen Aktivierungs- als auch Deaktivierungssituationen ein. Die Untersuchung jener Übergänge erfolgte in zwei empirischen Studien. Während einer realen sowie simulierten Autobahnfahrt konnte der Fahrer hier neben manuellen Anteilen ein Adaptive Cruise Control (ACC) und integrierte Systemauslegungen mit zusätzlich assistierter oder automatisierter Querführung nutzen. Es wurden Fahrerverhaltens-, Fahrerzustands- und Fahrerbewertungsparameter analysiert.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass weniger das Ausmaß an Automatisierung Einfluss auf die Güte des Bewusstseins des Fahrers über den Systemmodus hat, sondern eher der kognitive Aufwand bei der Differenzierung noch zu übernehmender Anteile der Fahraufgabe. Ist der Fahrer noch in den Regelkreis „Fahrer-Fahrzeug-Straße“ eingekoppelt, wird eine hierarchische (De-)Aktivierung von Systemen empfohlen. Ist dies nicht mehr der Fall, passt hingegen eine „Entweder-oder-Logik“ besser zur mentalen Fahrerrepräsentation. Weicht das tatsächliche Systemverhalten von dem Erwarteten ab, lassen sich damit verbundene Inkonsistenzen im mentalen Nutzermodell anhand verzögerter Fahrerreaktionen, höherer Fahrerbeanspruchungen und nutzerseitigen Angaben zur Intransparenz der Transition nachweisen. Handlungsfehler treten jedoch ausschließlich nur dann auf, wenn sich einander funktional ähnliche Systeme in der verfügbaren Automationsbandbreite befinden. So bewirkt die Verwechslung der Systemmodi in diesem Fall falsche Annahmen über den aktuellen Systemstatus und bedingt eine inadäquate Informationsaufnahme sowie Reaktion der Fahrer. Die Arbeit zeigt, dass vor allem Aktivierungsszenarien für derartige Automation Surprises sensitiv sind.

## **Abstract**

The present thesis deals with the user-centered design of handover and takeover situations in the context of driving. These relate to four stages of an automation concept, which ranges from (1) manual and (2) assisted driving to (3) partly autonomous and (4) highly autonomous driving. The central question regarding the considered transitions between driver and automation is whether it is transparent to the driver which system mode is active at the moment, what the active system does and how it depends on other driving functionalities.

Particular attention was paid to transition scenarios, which, referring to aviation research, are most likely to cause reduced system mode awareness and unintended effects like mode confusion and mode errors. Those transitions were characterized by different levels of control allocation and included indirect transitions to intermediate levels of automation. They also included functionally similar system modes, and both activation and deactivation situations. The evaluation of these transitions happened in two empirical studies. During a real and a simulated highway drive, the driver could use an ACC (Adaptive Cruise Control) and integrated system conceptions including assisted or automated lateral control next to manual portions of the drive. In addition, parameters for driver actions, driver state and subjective data were analyzed.

The results of this thesis demonstrate that it is not the level of automation that affects the driver's awareness about the system mode. His awareness level is rather affected by the cognitive effort to differentiate parts of the driving tasks that still need to be controlled manually. Is the driver still a part of the control loop between "driver-vehicle-road", a hierarchical (de-)activation of systems is recommended. If this is not the case anymore, an "either-or" logic fits better to the mental representation of the driver. If there is a difference between the expected and the actual behavior of the system, delayed driver reactions, higher driver workload and statements about lack of system transparency during transitions are the consequence. However, mistakes in action execution solely occur when functionally similar systems are located in the available automation range. In that case, mode confusion results in false assumptions about the current system status, inadequate assimilation of information as well as false driver reaction. The present thesis shows that these automation surprises primarily arise during activation scenarios.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Automatisierung im Fahrkontext aus technischer Sicht</b>	<b>4</b>
2.1	Geschichte und Zukunft der Automation im Fahrzeug	4
2.1.1	Historische Meilensteine der autonomen Fahrzeugführung	4
2.1.2	Stand der Technik im Bereich von Fahrerassistenzsystemen	7
2.1.3	Klassifikationsansätze von Fahrerassistenzsystemen	15
2.1.4	Perspektivische Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen	20
2.1.5	Der Weg zur Automation I: Integration von Einzelfunktionen	22
2.1.6	Der Weg zur Automation II: Mehrstufige Einbettung von Assistenzfunktionen	23
2.2	Rahmenbedingungen für Automatisierung im Fahrkontext	24
2.2.1	Kriterien aus unfalltheoretischer Sicht	24
2.2.2	Kriterien aus nutzerbezogener und infrastruktureller Sicht	28
2.2.3	Kriterien aus rechtlicher Sicht	31
2.3	Fazit	32
<b>3</b>	<b>Automatisierung im Fahrkontext aus psychologischer Sicht</b>	<b>35</b>
3.1	Veränderung der Rolle des Fahrers im Mensch-Maschine-System	35
3.1.1	Prinzipien der Funktionsverteilung	36
3.1.2	Taxonomien der Automatisierung	38
3.1.3	Rolle des Fahrers bei zunehmender Automatisierung	41
3.2	Auswirkungen der veränderten Rolle des Fahrers im Mensch-Maschine-System	42
3.2.1	Situation Awareness	43
3.2.2	Mode Awareness	49
3.2.3	Schemata und Mentale Modelle	55
3.2.4	Auswirkungen von Automation	61
3.2.5	Auswirkungen von Automation und Transition	64
3.3	Fazit	66
<b>4</b>	<b>Forschungsschwerpunkt der Arbeit</b>	<b>68</b>
4.1	Allgemeine Fragestellungen	68
4.2	Rahmenbedingungen der Arbeit	71
4.2.1	Mehrstufiger Automationsansatz	71
4.2.2	Systemmodi innerhalb des mehrstufigen Automationsansatzes	73
4.2.3	Anwendungskontext für die Systemmodi	76
4.2.4	Transitionssituationen zwischen den Systemmodi	76
4.2.5	Fazit	85
4.3	Spezifische Fragestellungen	86
4.4	Studienüberblick zur Untersuchung der Fragestellungen	92
4.4.1	Untersuchungsschwerpunkte der zwei durchgeführten Studien	92
4.4.2	Methodische Eckdaten der zwei durchgeführten Studien	93
<b>5</b>	<b>Studie I: Realfahrt auf der Autobahn mit einem Wizard-of-Oz Fahrzeug</b>	<b>95</b>
5.1	Ziele	95
5.2	Fragestellung und Hypothesen	96
5.3	Methodische Umsetzung	98
5.3.1	Automationsstufen	98
5.3.2	Integrierte Anwendungsfälle für Transitionen	99
5.3.3	Versuchsfahrzeug	101
5.3.4	Versuchsstrecke	110
5.3.5	Versuchsplan	111
5.3.6	Versuchsablauf	112
5.3.7	Stichprobe	114



5.4	Datenbasis .....	118
5.4.1	Videodaten .....	118
5.4.2	Fahrdaten .....	120
5.4.3	Fragebogendaten .....	123
5.4.4	Versuchsleiterprotokolle .....	124
5.4.5	Zusammenfassung .....	124
5.5	Ergebnisse .....	125
5.5.1	Erster Ergebnisblock: Transitionen in Richtung Automation .....	126
5.5.1.1	Zwischenfazit: Transitionen in Richtung Automation .....	134
5.5.2	Zweiter Ergebnisblock: Transitionen in Richtung Fahrer .....	136
5.5.2.1	Zwischenfazit: Transitionen in Richtung Fahrer .....	140
5.6	Zusammenfassendes Fazit .....	142
<b>6</b>	<b>Studie II: Simulatorfahrt auf der Autobahn mit erweiterten Transitionen .....</b>	<b>147</b>
6.1	Ziele .....	147
6.2	Fragestellung und Hypothesen .....	148
6.3	Methodische Umsetzung .....	151
6.3.1	Automationsstufen .....	151
6.3.2	Integrierte Anwendungsfälle für Transitionen .....	151
6.3.3	Fahr Simulator .....	154
6.3.4	Versuchsstrecke .....	159
6.3.5	Versuchsplan .....	163
6.3.6	Versuchsablauf .....	164
6.3.7	Stichprobe .....	168
6.4	Datenbasis .....	171
6.4.1	Videodaten .....	172
6.4.2	Fahrdaten .....	173
6.4.3	Biophysiological Daten .....	174
6.4.4	Fragebogendaten .....	182
6.4.5	Versuchsleiterprotokolle .....	182
6.4.6	Zusammenfassung .....	182
6.5	Ergebnisse .....	184
6.5.1	Erster Ergebnisblock: Transitionen in Richtung Automation .....	185
6.5.1.1	Zwischenfazit: Transitionen in Richtung Automation .....	208
6.5.2	Zweiter Ergebnisblock: Transitionen in Richtung Fahrer .....	211
6.5.2.1	Zwischenfazit: Transitionen in Richtung Fahrer .....	225
6.6	Zusammenfassendes Fazit .....	228
<b>7</b>	<b>Zusammenfassende Diskussion .....</b>	<b>234</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>254</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>255</b>
<b>10</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>298</b>
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>299</b>
<b>12</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>303</b>

## **1 Einleitung und Zielsetzung**

„Das vollständig autonom fahrende Auto werde zwischen 2020 und 2030 auf die Straße kommen“, prophezeit Matthias Wissmann, Präsident des Verbands der deutschen Automobilindustrie (Pander, 2013).

Dieses Zitat erklärt die deutlich wahrnehmbare Verschiebung der Schwerpunkte in der Fahrzeugentwicklung der letzten Jahre. Abseits klassischer Inhalte wie Fahrwerk, Karosserie, Akustik und Antrieb haben sich Fahrerassistenzsysteme als zentrales Themengebiet für die automatisierte Fahrzeugführung herauskristallisiert. So demonstrieren Automobilhersteller wie BMW, Daimler, Ford, Volvo, Nissan, Lexus und AUDI im Jahr 2014 auf der CeBit oder dem Genfer Autosalon erste Ansätze für dieses Zukunftsszenario. Kleinere Unternehmen wie Rinspeed schließen sich dem Trend mit kreativen Konzeptfahrzeugen an (z.B. Studie XchangeE). Das Unternehmen Google Inc. kommuniziert zudem bereits die Serienentwicklung von selbstfahrenden Autos (Skolow, 2013) und erreichte im US-Bundesstaat Nevada eine öffentliche Straßenzulassung für Erprobungszwecke (Preiss, 2012).

Die neue Generation an Fahrerassistenzsystemen soll den Fahrer folglich nicht nur bei der Wahrnehmung, Aufnahme sowie Verarbeitung von fahrrelevanten Daten unterstützen, sondern ihm gleichfalls in spezifischen Situationen (z.B. Notbremseingriff zur Unfallvermeidung) Anteile der Handlungsauswahl und -ausführung abnehmen. Sie adressieren damit zunehmend sicherheitsrelevante Bereiche und deutlich spätere Stufen des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses. Die technische Voraussetzung hierfür ist die Kombination von Assistenzsystemen, die in Längs- und Querrichtung des Fahrzeugs nahezu alle Basisaufgaben der Fahrzeugregelung abdecken. Es findet folglich ein Übergang von Einzelfunktionen hin zu integrierten Systemauslegungen statt. Dieser bewirkt, dass sich der Fahrer mit unterschiedlichen Graden an Assistenz und Automation auseinandersetzen muss. Er wird dementsprechend mit einer Bandbreite an Fahrfunktionen konfrontiert, die von der manuellen bis zur vollautomatisierten Fahrzeugführung reicht und Zwischenstufen einer assistierten, teil- sowie hochautomatisierten Fahrt umfasst (Gasser, et al., 2012). Letztere gehen mit einer integrierten Quer- und Längsführung einher, die der Fahrer nur noch bei der teilautomatisierten Fahrt dauerhaft überwachen muss. Resultat dieser Entwicklung kann dabei einerseits eine Steigerung der Verkehrssicherheit und des Fahrkomforts sein. Andererseits findet eine Erhöhung der Funktionskomplexität bei gleichzeitig zunehmender Entbindung des Fahrers aus dem Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Straße statt.

Unter Einbezug von Erkenntnissen aus der Automationsforschung zur Aufgabenverteilung in Mensch-Maschine-Systemen (Kantowitz & Sorkin, 1983; Endsley & Kaber, 1999; Sheridan &

Parasuraman, 2006) fordern die Automatisierungsbestrebungen den Fahrzeugführer somit, die Anzahl an Funktionen, inklusive deren einzelner Systemzustände zu verstehen. Neben der nunmehr eher passiven Überwachungsfunktion des Fahrers, erschweren dabei vor allem die miteinander verflochtenen und voneinander abhängigen Automatisierungsstufen den Wahrnehmungs- sowie Verstehensprozess. So ist jedes System nur unter ganz bestimmten Voraussetzungen aktivierbar und weist funktionsabhängige Grenzen auf. Um als Rückfallebene das Fahrzeug jederzeit beherrschen zu können, muss der Fahrer folglich ein angemessenes Bewusstsein über die vorliegende Situation und den gerade aktiven Systemmodus besitzen. Als Schlüsselfaktor hat sich hier vor allem im Luftfahrtkontext die sogenannte Mode Awareness als Wissen über das aktuelle und zukünftige Verhalten des Systems sowie dessen Zustände herauskristallisiert (Anthony & Degani, 1997). Sie ist die notwendige Voraussetzung für effiziente Handlungs- und Entscheidungsprozesse (Sarter & Woods, 1995). Passt das mentale Systemmodell des Fahrers nicht zum Systemstatus und dessen verhaltensbestimmenden Modus, treten Automation Surprises auf (Sarter, Woods & Billings, 1997). Diese manifestieren sich einerseits in Form von Modusverwechslungen, auch als Mode Confusion bezeichnet, und damit in falschen Annahmen über den vorliegenden Modus. Andererseits können Mode Errors im Sinne von Handlungsfehlern auftreten, welche häufig als Folge falscher Modusannahmen mit ausbleibenden oder unangemessenen Reaktionen verbunden sind (Sarter, Woods & Billings, 1997). Jene Auswirkungen verstärken sich bei der Interaktion mit Systemen, die aus automatisierten Teilfunktionen bestehen (Wiener, 1989) und durch zahlreiche Wechsel von Systemmodi gekennzeichnet sind (Schneider, 2008). Demgemäß sind sie auch im Automobilbereich parallel zu den technischen Entwicklungen in Richtung Automation zu erwarten. Die Rahmenbedingungen sind hierbei durch die gleichzeitige Verfügbarkeit von unterschiedlich stark automatisierten Fahrfunktionen im Fahrzeug und den damit verbundenen Übergangssituationen (Transitionen) in Richtung Fahrer sowie Automation gegeben.

Die zentrale Frage der vorliegenden Arbeit ist daher: Weiß der Fahrer zu jeder Zeit, welches System in seinem Fahrzeug gerade was tut? Im Fokus der Betrachtung stehen somit das Modusbewusstsein und die Analyse von Grundvoraussetzungen für die Vermeidung von Mode Confusion oder Mode Errors. Den Rahmen bildet ein vierstufiger Automationsansatz, welcher in Referenz zur Nomenklatur der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) die Teilstufen „Fahrer selbst“, „Assistiert“, „Teilautomatisiert“ und „Hochautomatisiert“ enthält (Gasser et al., 2012). Sie werden durch Systemmodi repräsentiert, die auf die Basisfunktionalitäten von Längs- sowie Querführungssystemen aufsetzen und diese einzeln bzw. integriert einbinden. Dadurch ergeben sich vier Systemmodi, welche im Kontext einer Fahrt auf der Autobahn in zwei Studien untersucht werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der

Betrachtung von Übergabe- bzw. Übernahmeszenarien zwischen dem Fahrer und den drei folgenden Systemstufen der Automation. Hierzu richtet sich das Augenmerk auf die Auswirkung von Transitionen, die entsprechend der Automationsforschung mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer geminderten Mode Awareness führen. Diese Transitionen sind durch insgesamt vier Kernmerkmale in der Arbeit charakterisiert. So wird erstens der Grad der Kontrollverschiebung unterschieden, welcher das Ausmaß an verfügbarer Automation beschreibt. Zweitens geht die Art des Übergangs in die Betrachtung ein. Der Fokus liegt hier auf indirekten Transitionen, welche Zwischenstufen der Automationsbandbreite und somit Teilfunktionen betreffen. An dritter Stelle erfolgt der Bezug zur Ähnlichkeit der Systemmodi. Dabei stellt sich die Frage, ob der Fahrer in Übergangssituationen einander funktional ähnliche Systeme kognitiv differenzieren kann. Das vierte Kriterium ergibt sich aus der Betrachtung der Richtung der Transition. So gehen hier sowohl Aktivierungs- als auch Deaktivierungsphasen ein, welche sich im Normalbetrieb oder an Systemgrenzen ereignen. Die explorativ geprägte Arbeit nutzt abschließend die Erkenntnisse aus den erfassten Verhaltens- und Fahrerzustandsdaten, um Gestaltungsempfehlungen für Übergabe- sowie Übernahmesituationen zwischen den betrachteten Stufen an Automation zu geben.

Zur Klärung der Fragen, gliedert sich die Arbeit wie folgt: In den Kapiteln 2 und 3 wird die zunehmende Automatisierung im Fahrkontext sowohl aus technischer als auch psychologischer Sicht betrachtet. Daraus lassen sich im Kapitel 4 die Kernfragestellungen der Dissertation ableiten. Sie bedingen die Festlegung von Rahmenkriterien, welche den Untersuchungsansatz der Arbeit definieren. Dieser mündet in zwei empirische Studien, welche im Realverkehr (Kapitel 5) und im Fahrsimulator (Kapitel 6) stattfanden. Kapitel 7 ordnet die daraus gewonnen Erkenntnisse in die Fragestellungen der Arbeit ein und leitet Gestaltungsempfehlungen ab. Kapitel 8 schließt mit einem Ausblick auf weitere, zu evaluierende Stellgrößen im Kontext von Automation und Transition im Fahrzeug.

## **2 Automatisierung im Fahrkontext aus technischer Sicht**

In diesem Kapitel wird im ersten Teil auf die Geschichte und die Zukunft der Automation im Fahrzeug eingegangen. Neben einem Rückblick auf die autonome Fahrzeugführung, setzt die Arbeit hierfür am Stand der Technik im Bereich Fahrerassistenzsysteme an und entwickelt ihn perspektivisch in Richtung Automation weiter.

Der zweite Teil des Kapitels konzentriert sich auf die Rahmenbedingungen für zunehmende Automatisierung im Fahrkontext. Diese erstrecken sich über Aspekte der Verkehrssicherheit bis hin zu rechtlichen Gesichtspunkten.

Das Kapitel schließt mit einem zusammenfassenden Fazit, welches auf Basis der technischen Weiterentwicklungsbestrebungen im Automobilbereich die Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit darstellt.

### **2.1 Geschichte und Zukunft der Automation im Fahrzeug**

Gegenwärtige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich automatisierter Fahrfunktionen können auf ein breites Grundlagenwissen zurückgreifen. Dies betrifft nicht nur fahrzeug- oder regelungstechnische Basiskenntnisse, sondern vor allem tiefergehende Arbeiten aus Forschungsprojekten innerhalb und außerhalb der Automobilindustrie. Das automatische Fahren hat demnach eine lange Geschichte, welche neben zahlreichen Hindernissen, zu wertvollen Erkenntnissen geführt hat. Auf die wesentlichsten Meilensteine jener Historie der autonomen Fahrzeugführung wird im Kapitel 2.1.1 eingegangen.

Da diese Arbeiten die anschließende Entwicklung in Richtung serientauglicher Systeme geprägt haben, schließt das Kapitel 2.1.2 mit dem Stand der Technik im Bereich von Fahrerassistenzfunktionen an und leitet zu deren Klassifikationsansätzen über (Kapitel 2.1.3). Damit zusammenhängend beinhalten aktuelle Definitionen von Unterstützungsgraden bei der Fahrzeugführung bereits die perspektivische Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen (Kapitel 2.1.4). So zeichnet sich die Integration von Einzelfunktionen in kombinierte Systemauslegungen ab (Kapitel 2.1.5) und führt zu einer mehrstufigen Einbettung von Fahrfunktionen (Kapitel 2.1.6). Dies mündet erneut in Forschungsprojekte, die sich mit automatisierten Systemen beschäftigen. Im Gegensatz zu den historischen Aktivitäten liegt der Hauptfokus allerdings nicht mehr auf technischen Fragen, sondern auf der veränderten Rolle des Fahrers im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt.

#### **2.1.1 Historische Meilensteine der autonomen Fahrzeugführung**

Bereits 1939 wurden auf der **Weltausstellung in New York** erste Ideen zur autonomen Fahrzeugführung präsentiert (Gardels, 1960). In den fünfziger bzw. sechziger Jahren folgten

dann erste Fahrversuche entlang von Leitkabeln. Zudem entstanden Forschungsprogramme, die zunächst die Geschwindigkeitsregelung, Kollisionsvermeidung sowie Fahrzeugsteuerung betrafen (Shladover, 1995). Jene Initiativen legten 1977 in Japan im Tsukuba Mechanical Engineering Lab den historischen Startpunkt für das automatische Fahren. Ein Fahrroboter erreichte hier auf einer Fahrstrecke mit deutlich sichtbaren Fahrspurmarkierungen eine Maximalgeschwindigkeit von ca. 30 km/h. Er legte dabei eine Distanz von 50 m zurück.

Diesen Arbeiten schlossen sich die Erfolge von **Professor Dickmanns** an, dessen Forschungsgruppe an der Universität der Bundeswehr in München 1986 das weltweit erste Roboter-Auto mit dem Namen „**VaMoRs**“ (Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen) vorstellten (Zapp, 1988; Behringer & Müller, 1998). VaMoRS fuhr auf einer abgesperrten Autobahn eine Strecke von 20 km mit der Höchstgeschwindigkeit von 96 km/h. Bedingt durch diese Leistung unterstützte die Europäische Union von 1987 bis 1995 das Forschungsprojekt **PROMETHEUS** (Programme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety). Die im Rahmen von PROMETHEUS entstandenen Fahrzeuge wie „**VaMP**“ (Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen, Passenger Car), „**VITA**“ (Vision Technology Application) oder „**OSCAR**“ (Optically Steered Car) stellten erneut unter Beweis, dass aus technischer Sicht eine Fahrzeugführung ohne Fahrer realisierbar ist (Braess & Reichart, 1995; Braess, 2003). So fuhren bei der Abschlusspräsentation des Projekts im Jahr 1994 „VaMP“ sowie „**VITA II**“ im öffentlichen Straßenverkehr mit automatischer Längs- und Querführung (Dickmanns et al., 1994). Sie legten mehr als 1000 km auf einer dreispurigen Autobahn mit Geschwindigkeiten bis zu 130 km/h zurück. Es wurden Fahrstreifenwechsel in beiden Richtungen sowie autonome Überholmanöver demonstriert. Im Jahr 1995 fuhr VaMP II vollautonom 1.758 km auf der Autobahn von München nach Odense (Dänemark) und Retour (Müller, 1996). Die längste zurückgelegte Strecke ohne menschlichen Eingriff betrug dabei 158 km (Dickmanns et al., 1994).

Neben PROMETHEUS zeigte auch das amerikanische Forschungsprogramm **PATH** (Partners for Advanced Transit and Highways) seit 1986 Aktivitäten in der Hard- und Softwarekonzeption für ein autonomes Fahren (Wünsche, 2013). So demonstrierten im Jahr 1997 acht Pkws auf der Interstate 15 nahe San Diego eine automatische Kolonnenfahrt. Neben der Regelung von Fahrzeugkolonnen („platoons“) über präzise Andockverfahren standen in dem Projekt gleichfalls die automatische Spurhaltung mit Hilfe von Magneträgeln in der Fahrbahn, automatische Fahrstreifenwechsel und die autonome Einzelfahrt mit bis zu 97 km/h im Vordergrund (Godbole & Lygeros, 1993). Vergleichbare internationale Forschungsprogramme wurden in den Vereinigten Staaten unter dem Kürzel „**IVI**“ (Intelligent Vehicle Initiative), „**AHS**“ (Automated Highway System) oder „**IVHS**“ (Intelligent Vehicle

Highway Systems) sowie in Japan unter dem Namen „AHSRA“ (Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association) oder „PVI“ (Personal Vehicle System) bekannt (vgl. McQueen & Catling, 1991; Lasky & Ravani, 1993; Behringer, 1997).

Weitere Aufmerksamkeit erhielt das autonome Fahren im Jahr 1998, als das Fahrzeug „**ARGO**“ der Universität Parma innerhalb von sechs Tagen 2000 km auf öffentlichen Straßen zurücklegte und dabei zu 94 % vollautonom agierte (Broggi et al., 1999). ARGO besaß drei Betriebsmodi, die erstens die manuelle Steuerung mit akustischen bzw. optischen Warnsignalen in gefährlichen Situationen beinhaltete. Zweitens existierte eine sogenannte überwachte Steuerung, welche den Fahrer bei Gefahren warnte und die Fahrzeugführung zur Unfallvermeidung vollständig übernahm. Als dritter Zustand wurde ein automatischer Modus integriert, der das Fahrzeug vollautonom steuerte. Die zeitlich anschließenden Entwicklungs- und Forschungsrichtungen hatten dann primär das Ziel, intelligente Transportsysteme zu schaffen, elektronische Copiloten näher zu untersuchen oder den effizienten Einsatz führerloser Fahrzeuge zu erproben (Siedersberger, 2003). Eine Anwendung zu Testzwecken entstand Anfang der neunziger Jahre, deren Schwerpunkte die Verkürzung von Prüfzeiten für Serienfahrzeuge sowie die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen betrafen. Diesbezüglich entwickelte die Volkswagen AG im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes „Autonomes Fahren“ (1997-2000) einen kamerageführten VW-Bus, der quer- und längsgeregelt einen Materialermüdungskurs autonom abfahren konnte. Analoge Überlegungen mit dem Ziel einer besseren Auslastung der Transport- und Straßenkapazität generierten zudem Projekte wie beispielsweise:

- CYBERCARS, 1997-2004
- PROMOTE CHAUFFEUR I, 1996-1998
- RUF Dual Mode Public Transport, seit 1999
- PROMOTE CHAUFFEUR II, 2000-2003
- EFAS (Einsatzszenarien für Fahrerassistenzsysteme im Güterverkehr und deren Bewertung), 2001-2002
- MFG (Vorbereitende Maßnahmen für den praktischen Einsatz von Fahrerassistenzsystemen im Güterverkehr), 2003-2004
- PHILEAS, seit 2004

Mit der Beendigung von PROMETHEUS wurden in Deutschland Projekte wie **MOTIV** (Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr, 1996-2000) und **INVENT** (Intelligenter Verkehr und nutzerzentrierte Technik, 2001-2005) initiiert. Deren Ziele betrafen vor allem die Entwicklung neuer Informationstechnologien und neuer Fahrerassistenzsysteme. Letztere sollten hauptsächlich Ballungsräume adressieren und zudem auf den gesamten Geschwin-

digkeitsbereich, inklusive Stop-&-Go Verkehr erweitert werden. Insbesondere aus der Forschungsinitiative INVENT gingen zukunftssträchtige Innovationen wie die Kreuzungs-, Querführungs- oder Stauassistenten hervor. Jene prägen unter anderem den heutigen Forschungsstand für potentielle, serientaugliche Applikationsformen des automatischen Fahrens.

Zusammen mit den theoretischen Erkenntnissen aus PROMETHEUS wurde somit eine solide Grundlage geschaffen, um gezielt in praktische Anwendung überzugehen. Ein Beispiel hierfür ist das Verbundprojekt „**KONVOI**“, welches von 2005 bis 2008 LKW-Konvois im realitätsnahen Betrieb erprobte und deren Wirkungen auf das Gesamtsystem „Mensch-Fahrzeug-Umwelt“ untersuchte (Deutsche, 2006; Skottke, 2007). Daneben zeigen die 2004 bzw. 2005 stattgefundenen Grand Challenges der **DARPA** (Defense Advanced Research Projects Agency) sowie die Urban Challenge des Jahres 2007, welchen Höhepunkt die Forschung auf dem Gebiet autonomer Fahrzeuge aus technischer Sicht erreicht hat (Thrun et al., 2006). Der automatisierte Verkehr ist kein abstraktes Themenfeld mehr, sondern reifte durch die zahlreichen Forschungsarbeiten der Vergangenheit zu einem realistischen Zukunftsszenario heran. Laut Walker, Stanton und Young (2001) könnte bereits im Jahr 2030 mit Vollautomatisierung gerechnet werden. Dieser Zeitpunkt ist jedoch an notwendige Rahmenbedingungen gekoppelt (vgl. Abschnitt 2.2), die zudem hinreichend mit psychologischen Erkenntnissen zur Auswirkung einer zunehmenden Automatisierung auf die Rolle des Fahrers im Mensch-Maschine-System vereint werden müssen (vgl. Kapitel 3).

### **2.1.2 Stand der Technik im Bereich von Fahrerassistenzsystemen**

Mit Bezug zum Kapitel 2.1.1 wurden bereits in der Vergangenheit bedeutsame Grundlagen für technische Zusatzeinrichtungen im Fahrzeug geschaffen, die den Fahrzeugführer vollständig von der Fahraufgabe entbinden können. Die Übertragung dieser Erkenntnisse auf serientaugliche Applikationsformen führte jedoch vorwiegend aus haftungsrechtlichen Gründen zunächst zu Systemen, die den Fahrer nur in Teilbereichen (z.B. Kollisionsvermeidung) oder bei unterschiedlichen Aufgaben der Fahrzeugführung (z.B. Spurhaltung) unterstützen (Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski, 2009). Derartige **Fahrerassistenzsysteme (FAS)** fokussierten dabei primär den Komfort- sowie Sicherheitsbereich und wurden zudem von Effizienzbetrachtungen untermauert. Ziel war es, die Diskrepanzen zwischen den Anforderungen der Verkehrssituation und dem Leistungsvermögen des Fahrers zu beseitigen (Fuller, 2005). Mit Hilfe der FAS sollte der Fahrer außerdem zusätzliche zeitliche Spielräume für die Handlungsausführung bekommen und durch aktive Eingriffe in die Fahrdynamik die Fahrzeugkontrolle zurück erhalten (Gelau, Gasser & Seeck, 2009).



Dies führte zu einer Vielzahl an Fahrfunktionen, die aufgrund der rasanten Entwicklung von Aktuatorik und Sensorik teilweise nicht mehr direkt mit dem Begriff „Fahrerassistenzsystem“ verbunden werden. So sind beispielsweise die automatische Rückstellung des Blinkers oder die Einführung der Servolenkung im Jahr 1952 durchaus auch als Meilensteine eines assistierten Fahrens anzusehen. Weitere historische Ankerpunkte in der Entwicklung erster **Applikationsformen für gegenwärtige Serienkraftfahrzeuge** stellt die Abbildung 1 grafisch dar (Winner, Danner & Steinle, 2009). Auf einige der hier benannten Fahrerassistenzsysteme wird im Folgenden eingegangen. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf Funktionen, die in Längs- und Querrichtung des Fahrzeugs die Grundlage für die integrative Nutzung von Assistenzsystemen schafften und damit den Übergang zum automatischen Fahren formten (vgl. Kapitel 2.1.4, 2.1.5).

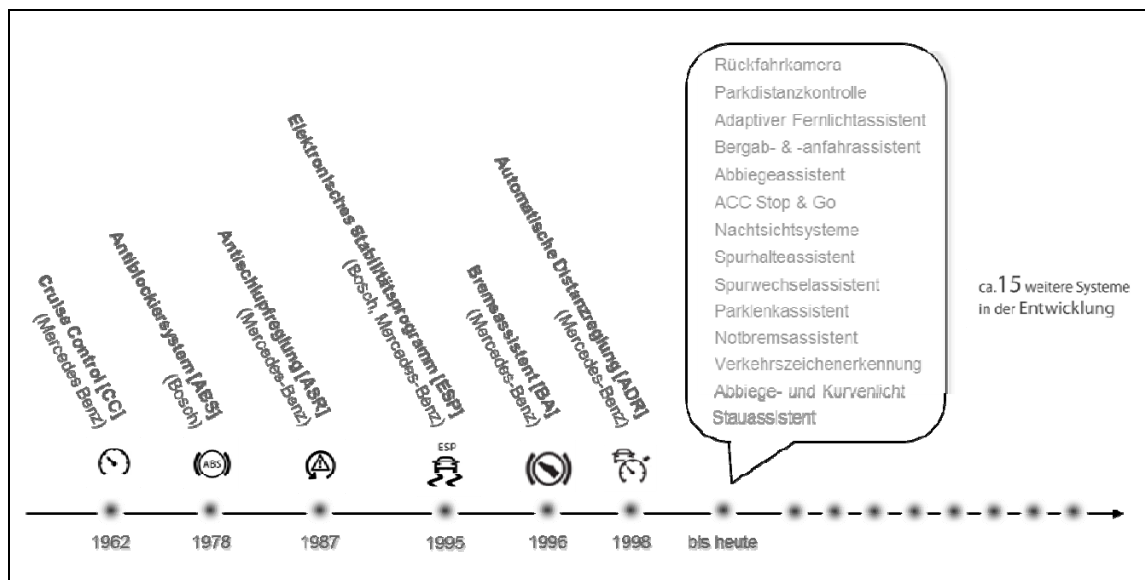


Abbildung 1: Meilensteine der Fahrerassistenzsystemeinführung in Deutschland

Beginnend bei fahrzeugstabilisierenden Systemen wie dem Antiblockiersystem (ABS) oder dem Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP), welche das Blockieren der Räder bei starken Bremsungen verhindern oder über gezielte Bremseingriffe an den Fahrzeigrädern Schleudersituationen vermeiden, haben sich FAS in weiten Bereichen entwickelt und am Markt etabliert (Wyman, 2003). So unterstützen elektronische Fahrzeugkomponenten auch beim **Parken und Rangieren**. Die für derartige Fahrmanöver benötigten Daten werden aus Umfeldsensoren (Ultraschall, Short-Range-Radar) zur Detektion von Objekten oder Hindernissen in Längsrichtung gewonnen (Katzwinkel et al., 2009). Sie dienen einerseits zur reinen Parklückenvermessung mit Ausgabe eines Kompatibilitätsgrades über akustische Intervalltöne (z.B. Parktronic von Mercedes-Benz) oder optische Anzeigen im Navigationssystem (Optical Parking System). Andererseits erleichtern seit 2003 Rückfahrkameras über die Einblendung von Hilfslinien das Längs- und Querparken. Der assistierte Parkvorgang wird zu-

dem durch die Anzeige von notwendigen Lenkmanövern sowie einer Trajektorienplanung ergänzt. In Erweiterung hierzu stehen seit 2007 Einparkhilfen zu Verfügung, bei denen der Fahrer von der Querregelung über die Ansteuerung der elektromechanischen Servolenkung entbunden wird (z.B. Park Assist der Volkswagen AG, Intelligent Park Assist von Toyota). Teilweise beherrschen die Systeme das mehrzügige Einparken in Quer- und Längsparklücken sowie das mehrzügige Ausparken in Längsrichtung. Die Betätigung von Gas, Bremse und Kupplung verbleibt allerdings beim Fahrer. Vollautomatische Einparkassistentensysteme sowie das assistierte Ausparken aus Querparklücken haben hingegen noch Forschungsstatus (Schanz, 2005).

Neben diesen Systemen verbessern andere Fahrerassistenzen **Sicht und Licht** während der Fahrt (Schlag et al., 2008). Die Innovationen betreffen hierbei vor allem Weiterentwicklungen in der Lichtquellentechnologie sowie die Art der Lichtverteilung bei Dämmerung und Nacht. So wird die Nutzung von Xenonentladungslampen für Frontscheinwerfer zu Beginn der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts als wichtiger Meilenstein betrachtet (Khanh & Huhn, 2009). Die seit 2007 erhältlichen, lichtemittierenden Dioden (LED) haben dagegen derzeit nur einen geringen Marktanteil. Intelligente Scheinwerfersysteme mit adaptiven Lichtverteilungen (Advanced Frontlighting Systems) für die Stadt, das Land und die Autobahn, inklusive Fern-, Kurven- sowie Schlechtwetterlicht ergänzen diese Neuerungen. Das Abbiege- bzw. Kurvenlicht setzt in statischer bzw. dynamischer Ausführung zudem eine Anpassung des Lichtkegels an die Bahntrajektorie des Fahrzeugs um. Weitere Applikationen sind in Form des Markierungslichts, der adaptiven Leuchtweitenreglung und des blendungsfreien Fernlichts zu finden (Khanh & Huhn, 2009). Zur Fahrerunterstützung bei Nachtfahrten gibt es daneben Nah- und Ferninfrarotsysteme, die ihre Informationen auf einem Bildschirm im Kombiinstrument, im Infotainmentbereich oder auf einem Head-Up-Display anzeigen (Wallentowitz et al., 2009).

Auch im Bereich der **Navigation und Telematik** wurden Verbesserungen erzielt, die der Weiterentwicklung von FAS dienen (Winner, Danner & Steinle, 2009). So finden sich seit dem ersten europäischen Seriennavigationsgerät im Kraftfahrzeug von 1989 zunehmend Fortschritte in der Ortung, Zieleingabe, Zielführung, Routenberechnung und Kartendarstellung (Kleine-Besten et al., 2009). Außerdem erfolgt eine Einbeziehung von sogenannten POI (Points of Interests), Umweltereignissen (z.B. Eisglätte) und Verkehrsinformationen (z.B. Stau) in die aktuelle Route. Analog hierzu werden zukünftige Innovationsgestützte (z.B. „Stau-voraus-Warner“) und navigationsunterstützte Assistenzfunktionen (z.B. „Eco-Driving“) betreffen (Nöcker, Mezger & Kerner, 2005). Derzeit verfügbare Rund- oder Mobilfunktechnologien (z.B. Bluetooth) sowie Telematik-Basisdienste (Emergency Call)

zeigen zudem Entwicklungen in Richtung Softwaredownloads (z.B. Musikdateien) sowie bidirektionaler Fahrzeugkommunikation (z.B. Vehicle-to-Vehicle). Insbesondere letztere Aktivitäten werden dazu führen, dass die sensorbasierte Regelung von FAS durch kooperative Assistenz- und Sicherheitsfunktionen erweitert wird. Dies ermöglicht z.B. eine frühere Auslösung von Kollisionswarnungen oder fahrzeugseitigen Eingriffen (z.B. Lee et al., 2002). Das Auftreten von Fehlwarnungen bzw. unerwünschten Auslösungen muss hierbei allerdings abgewogen werden (vgl. Problem des „Warndilemmas“ in Häring, Wilhelm & Branz, 2009).

Am weitesten vorangeschritten sind Fahrerassistenzsysteme, welche den Bereich der Bahnführung betreffen (vgl. Abbildung 6) und somit parallel zum Fahrer die Planung der Soll-Trajektorie vornehmen. Die seit den 90er Jahren für diesen Bereich entwickelten **Quer- und Längsführungssysteme** umfassen Abstandstempomaten, Systeme mit adaptiver Geschwindigkeitsanpassung, Brems- und Spurhalteassistenten sowie Fahrfunktionen, die beim Fahrstreifenwechsel oder beim Abbiegen helfen (Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski, 2009). Unter Berücksichtigung der aktuellen Automatisierungstendenzen im Automobilbereich (vgl. Kapitel 2.1.3) nehmen hierbei das ACC (Adaptive Cruise Control) und Spurhaltesysteme (z.B. Lane Assist der Volkswagen AG) eine besondere Stellung ein. Aus diesen Gründen und angesichts der Bedeutung dieser FAS für die inhaltlichen Überlegungen der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 4) werden jene Funktionen im Folgenden detaillierter dargestellt.

Das **ACC** ist ein System, welches den Fahrer in der längsdynamischen Fahrzeugführung unterstützt. Es stellt eine Weiterentwicklung des Tempomaten (Cruise Control, vgl. Abbildung 1) dar, welcher eine vom Fahrer gewählte Setzgeschwindigkeit konstant hält. Bereits 1995 präsentierte Mitsubishi im Modell Diamante das ACC erstmals - ein Jahr später folgte Toyota (Watanabe et al., 1995). In Europa war das System erst 1998 erhältlich (vgl. Abbildung 1) und konnte mit der ISO 22179 (DIN EN ISO 22179, 2008) auf den niedrigen Geschwindigkeitsbereich (Full-Speed-Range [FSR] ACC) erweitert werden (vgl. Abbildung 2, modifiziert nach Winner, Danner & Steinle, 2009).

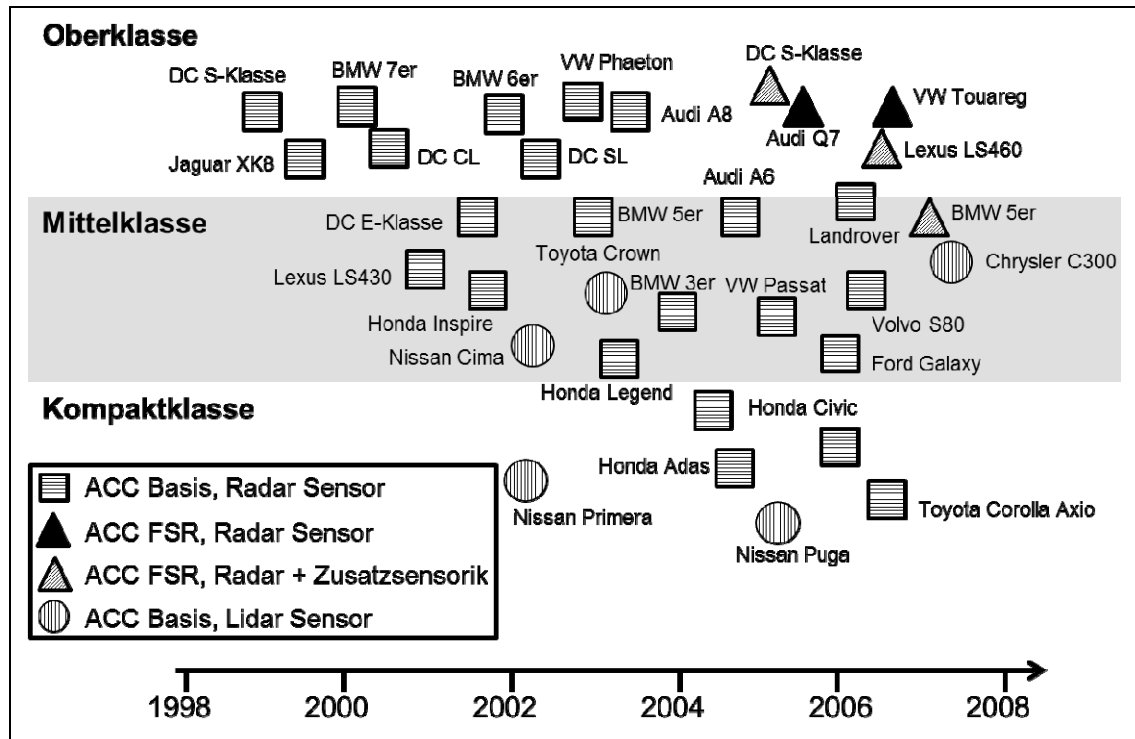


Abbildung 2: Übersicht über Fahrzeugmodelle mit ACC am Markt (Winner, Danner & Steinle, 2009; modifiziert)

Vom ACC werden Fahrzeuge, die sich in Fahrtrichtung in der gleichen Spur befinden, mit Hilfe von Abstandssensoren auf der Basis von Radar-, Lidar- oder Bildverarbeitungstechnologien detektiert. Deren Erfassungsbereiche liegen bei etwa 150 Metern. Damit reagiert der ACC-Sensor allerdings später auf vorausfahrende Fahrzeuge als es der Mensch bei angemessenem Situationsbewusstsein tut (vgl. Kapitel 3.2.1). So konnte Lange (2007) nachweisen, dass der menschliche Sensor aufgrund seiner weiten Vorausschau und Antizipationsfähigkeit im Vergleich zum ACC in der Lage ist, Situationen viel früher zu erfassen und einzuschätzen (vgl. hierzu auch Modell der Gefahrenkognition nach Schlag, 2008). Im Gegensatz dazu kann das ACC die menschlichen Defizite in der Schätzung von Entfernungen und Differenzgeschwindigkeiten durchaus kompensieren (Bubb, 1977; Bubb & Bolte, 1990; Cavallo & Cohen, 2001). So ermittelt das Fahrerassistenzsystem auf der einen Seite den Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug. Auf der anderen Seite passt es auf dieser Grundlage den vom Fahrer vorab eingestellten Abstand durch Eingriffe in das Motormanagement oder in die Bremse mit maximal  $-3 \text{ m/s}^2$  an. Des Weiteren ermöglicht die Beschleunigungsfähigkeit des ACC ein zügiges Mitschwimmen und Aufschließen auf Vorderfahrzeuge sowie eine Konstantgeschwindigkeitsregelung mit hohem Regelkomfort (Winner, Danner & Steinle, 2009).

Der Anwendungsbereich vom ACC liegt primär auf Autobahnen und Landstraßen. Es existieren allerdings gleichfalls Applikationen für den innerstädtischen Verkehr. Der Geschwindigkeitsregelbereich wurde hierfür von den Automobilherstellern bis auf das Abbremsen in den Stillstand erweitert (ACC Follow-to-Stop). Zudem ermöglicht das ACC Stop-and-Go ein selbstständiges Anfahren nach kurzem Stillstand (oberhalb von vier Sekunden Standzeit) oder ein fahrergetriggertes Wiederaufahren (Antippen des Fahrpedals oder Betätigung des ACC Bedienhebels). Ferner erfolgte die Integration von Sensoren zur Erkennung von stehenden Objekten. Das ACC verliert jedoch seine Kernfunktionalität, wenn eines der peripheren Systemteile ausfällt (z.B. infolge einer Sensorverschmutzung). Die Restfunktionalität des Tempomaten mit einer Geschwindigkeitsregelung ohne Abstandsanpassung kann weiterhin genutzt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass Systeme wie Antrieb oder Bremse und die Anzeige- sowie Bedienelemente noch intakt sind (Winner, Danner & Steinle, 2009). Bei der Umschaltung muss aber beachtet werden, dass sich die Systemeigenschaften drastisch verändern und mit einem vom ACC deutlich abweichenden Verhalten einhergehen. Damit verbunden setzt eine derartige Modifikation voraus, dass dem Fahrer die Systemzustandsveränderungen stets bewusst sind. Das mental repräsentierte Systemwissensmodell seitens des Nutzers (vgl. Kapitel 3.2.3) muss daher zu jeder Zeit dem tatsächlichen Systemverhalten entsprechen. Inkompatibilitäten können zu inadäquaten oder ausbleibenden Reaktionen in sicherheitsrelevanten Situationen führen. Hintergrund dieser sind zumeist so genannte Automation Surprises, die mit Verwechslungen von Systemzuständen oder Bedienfehler einhergehen (vgl. Kapitel 3.2.2). Aufgrund dieser Kernanforderungen haben derzeit nur wenige Automobilhersteller die Restfunktionalität des Tempomaten freigegeben (z.B. BMW, ab Modelljahr 2007).

Neben den bereits beschriebenen Funktionsabstufungen weist das ACC zudem verschiedene Zustände und Zustandsübergänge (Transitionen) innerhalb des Systems auf. Grundsätzlich kann diesbezüglich zwischen „ACC-off“, „ACC-stand-by“ und „ACC active“ unterschieden werden (vgl. Abbildung 3; modifiziert nach DIN EN ISO 15622, 2002). „ACC-off“ entspricht hierbei dem Einschaltzustand, aus dem der Fahrer das System explizit in den Zustand „ACC-stand-by“ überführen kann. Dieser Wartezustand ermöglicht wiederum die Aktivierung des Systems (Zustand: „ACC active“), sofern alle Vorbedingungen dafür erfüllt sind. In Freifahrtsituationen oder bei Folgefahrten hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug treten zudem die Zustände „Speed control“ und „ACC time gap control“ hinzu (vgl. Abbildung 3; modifiziert nach DIN EN ISO 15622, 2002). Beim zuletzt genannten Fall passt das ACC die Geschwindigkeit an das Vorderfahrzeug an und hält den Abstand gemäß der fahrerseitig gesetzten Sollzeitlücke ein.

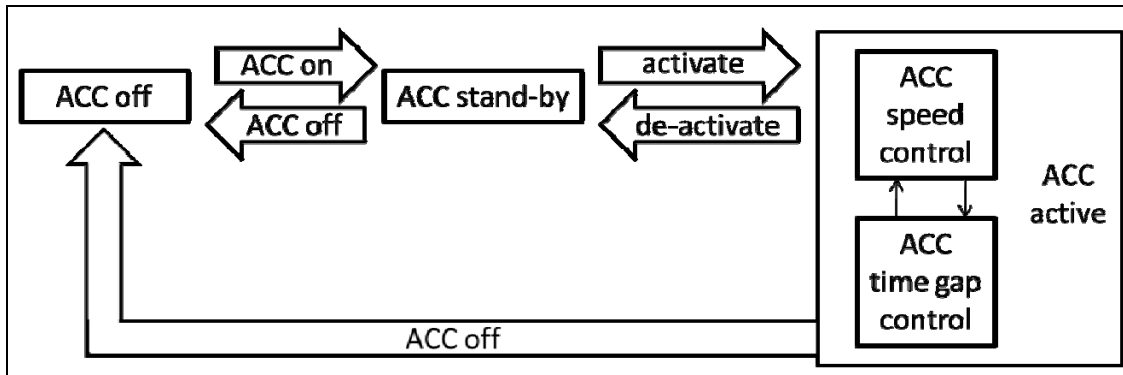


Abbildung 3: ACC Zustände nach ISO 15622 (DIN EN ISO 15622, 2002; modifiziert)

Weitere Zustände ergeben sich beim Full-Speed-Range-ACC (vgl. DIN EN ISO 22179, 2008) und infolge der Menge an Aktivierungs- bzw. Deaktivierungsbedingungen (Winner, Danner & Steinle, 2009). Diese Komplexität wird durch zahlreiche Unterschiede der am Markt erhältlichen Systeme erhöht und führt in der Folge häufig zur Intransparenz seitens der Kunden (Lange, 2008). Infolge der variierenden Funktionsauslegungen besteht die Gefahr einer erhöhten Belastung des Fahrers, eines geringen Systemverständnisses und daraus resultierend einer geminderten Kundenakzeptanz (Wolf, 2006; Lange, 2008). Die komplexe Funktionslogik des ACC wird sich zudem durch zukünftige Weiterentwicklungen des Systems nicht vereinfachen. So werden beispielsweise Folgefahrten im Stau mit automatischer Längs- und Querführung (vgl. Stauassistent von Mercedes) den Fahrer zwar kurzzeitig entlasten, ihn jedoch parallel in eine überwachende Rolle versetzen (vgl. hierzu Kapitel 3). Dabei muss der Fahrer nicht mehr nur Wissen zu Einzelsystemen aufweisen, sondern auch deren Abhängigkeiten voneinander kennen sowie deren integrative Funktionsweise nachvollziehen.

Im Unterschied zum ACC ist der Spurverlassenswarner bzw. das **Lane Departure Warning (LDW)** ein System, dass bei der Querführung assistiert. Derartige Spurführungssysteme, zu denen auch der Lane Keeping Support (siehe weiter unten) gehört, detektieren mit Hilfe bildverarbeitender Sensoren und / oder seitlicher Lasersensoren die Position des Fahrzeugs in Relation zu den Fahrspurmarkierungen. Diesbezüglich ist festzustellen, dass die in früheren Systemen verwendeten „Charge-Coupled Device“ (CCD) Kameras zunehmend durch „Complementary Metal Oxide Semiconductor“ (CMOS) Kameras ersetzt werden (vgl. Abbildung 4). Einfluss auf die Genauigkeit der Kameras haben verschiedene Straßenbeläge, unvollständige oder mehrdeutige Fahrbahnmarkierungen (z.B. in Baustellen), Blendungen durch Sonneneinstrahlung sowie Wetter- und Witterungsverhältnisse (z.B. Schnee, Nebel).

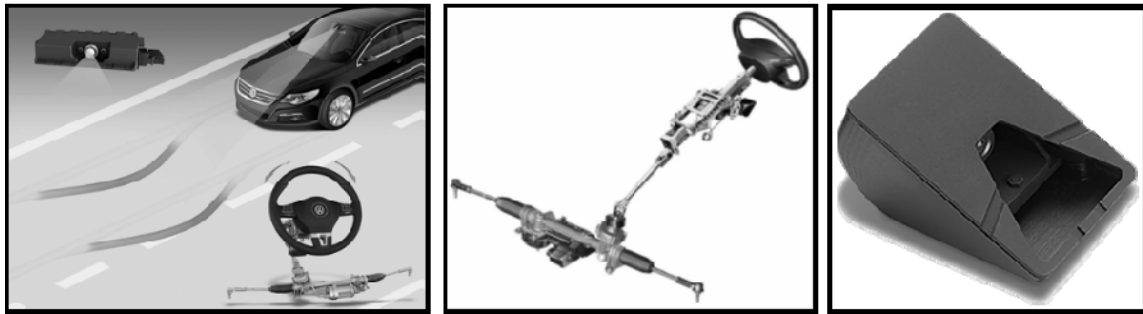


Abbildung 4: Komponenten eines Spurführungssystems (links), elektromechanische Servolenkung (Mitte), CMOS Kameramodul der Firma ADC (links) (VW, 2007)

Mit Hilfe fahrzeuginterner Daten (Längs-, Quer- und Giergeschwindigkeit sowie Lenkradwinkel) kann außerdem der weitere Verlauf der Fahrzeugbewegung vorausberechnet werden. Diese Berechnung erfolgt über unterschiedliche Ansätze. Zu nennen sind beispielsweise Regelungsstrategien auf Grundlage des „Aim Point Error“ (Kaussner, Buld & Krüger, 2000) oder der „Time to Line Crossing (Godthelp, Milgram & Blaauw, 1984). Blinkerbetätigungen gehen daneben als Kenngrößen zur Bestimmung der Fahrerabsicht ein. Bei drohendem Verlassen der Fahrspur wird der Fahrer in der Regel über ein visuelles, akustisches oder ungerichtetes, haptisches Signal gewarnt (DIN EN ISO 17361, 2007). Beispiele hierfür sind häufig im Bereich der Nutzfahrzeuge zu finden (z.B. Lane Guard System bei MAN, Telligent Spurassistent im Mercedes-Benz Actros). Als Umsetzungsformen im Pkw können Sitzvibrationen (z.B. AFIL von Citroen) oder Lenkradvibrationen (z.B. Audi Lane Assist, Spurverlassenswarner von BMW, Nissan Lane Deviation Avoidance) benannt werden. Abbildung 5 zeigt exemplarisch den „Audi Lane Assist“, der die Fahrspur bzw. die Fahrbahnbegrenzung erkennt und bei Annäherung an die Begrenzungslinie den Fahrer durch eine Vibration des Lenkrades warnt.

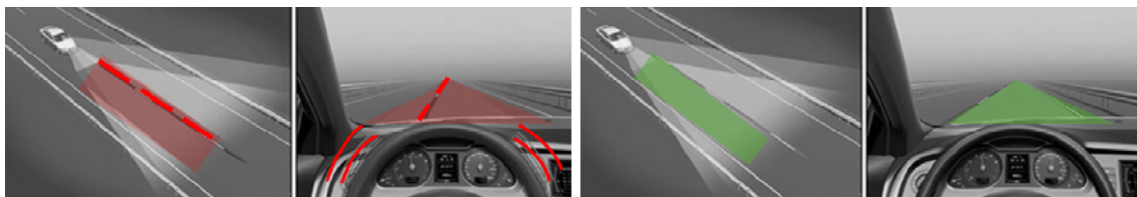


Abbildung 5: AUDI Lane Assist (Vukotich & Popken, 2005; modifiziert)

Eine funktionale Erweiterung des LDW stellen **Lane Keeping Support (LKS)** Systeme bzw. das **Heading Control (HC)** dar. Diese Fahrfunktion warnt nicht nur vor Gefahrensituationen, sie greift auch aktiv in die Fahrzeugsteuerung ein. So wird mit Hilfe von elektromechanischen Lenksystemen (vgl. Abbildung 4, Mitte) ein zusätzliches Lenkmoment aufgebracht, welches das Fahrzeug in Richtung Spurmitte steuert. Erste Markteinführungen fanden sich im Nissan Cima, dessen LKS für einen Geschwindigkeitsbereich von 70 bis 100 km/h ausgelegt war.

Es folgten Mitsubishi mit dem Driver Support System im Proudia und zum Beispiel Volkswagen 2008 mit dem Lane Assist im Passat CC. Derzeitig verfügbare LKS Systeme sind auf die Nutzung auf der Autobahn und teilweise Landstraße begrenzt (Gayko, 2009). Analog zum ACC variieren hier allerdings auch die herstellerseitig definierten Funktionsgrenzen sowie -auslegungen. Demzufolge ist mit vergleichbaren Auswirkungen auf die Transparenz und Akzeptanz der Systeme seitens der Kunden zu rechnen. Dennoch bleibt der Nutzer hier stets in der Verantwortung des Fahrzeugführers (vgl. Kapitel 2.2.3). In diesem Zusammenhang verhindern so genannte „Hands-off“ Abschaltungen, dass der Fahrer die Hände zu lange vom Lenkrad nimmt. So muss der Fahrer auch beim Lane Keeping Assistent von Honda (Rechtslenker) noch ein Fünftel des Lenkmomentes beisteuern, obwohl das System das Fahrzeug bereits vollständig autonom in der Spur halten kann (vgl. auch Stauassistent von BMW). Da derartige Spurhaltesysteme ein großes Potenzial zur Unfallvermeidung besitzen (vgl. Kapitel 2.2.1), ist deren Erweiterung auf eine fahrspurzentrierte Führung ohne hands-off Warnung absehbar.

Aus den vorangegangenen Darstellungen zum Stand der Technik im Bereich Fahrerassistenz wird unter anderem ersichtlich, dass bestehende Systeme zukünftig mit einer deutlichen Intelligenzzunahme verbunden sind (Bubb, 2003). Dies bewirkt auf der einen Seite, dass sie immer stärker in Interaktion mit dem Fahrer treten und ihn bei der Durchführung von Teilaufgaben der Fahraufgabe umfassender unterstützen. Auf der anderen Seite lösen die Systeme die klassische Verteilung der Fahrzeugführungsaufgaben auf und automatisieren Prozesse der menschlichen Informationsverarbeitung. Daraus resultiert, dass sich FAS nicht mehr eindeutig definieren lassen und zu einer Unschärfe des Begriffs führen (Freyman, 2004; Wandke, Wetzenstein & Polkehn, 2005). Damit verbunden hat sich eine Vielzahl von Klassifikationsansätzen für Fahrerassistenzsysteme herausgebildet, denen teilweise heterogene Betrachtungsweisen zugrunde liegen. Der folgende Abschnitt 2.1.3 widmet sich daher der Darstellung der gängigsten dieser Gliederungskonzepte.

### **2.1.3 Klassifikationsansätze von Fahrerassistenzsystemen**

Auf relativ globaler Ebene findet sich die Gliederung von FAS aus der Perspektive der **Gesamtfahraufgabe** (Geiser, 1985). Diese Differenzierung mündet in einen primären, sekundären sowie tertiären Teil (Bubb, 2003; Wolf, Zöllner & Bubb, 2005). Die primäre Ebene bezieht sich auf das Halten des Fahrzeugs auf der Straße. Die sekundäre betrifft Fahraufgaben, die sich aus den Verkehrsregeln sowie Verkehrs- und Umweltbedingungen ergeben. Die tertiäre steht hingegen in Verbindung mit der Befriedigung von Komfort- bzw. Informationsbedürfnissen und ist demnach keine Fahraufgabe im eigentlichen Sinne. Die Trennung zwischen den drei Kategorien ist jedoch nicht immer ausschlussfrei möglich (Wandke,



Wetzenstein & Polkehn, 2005). Zudem ist eine Einteilung heutiger und zukünftiger FAS nach diesem Ansatz nicht spezifisch genug, um Auswirkungen auf die Mensch-Maschine-Interaktion abzuleiten.

Besser geeignet ist hierfür die Differenzierung nach der **Art der unterstützten Teilaufgabe**. Demgemäß kann der primäre Teil der Fahrzeugführung mit Hilfe eines hierarchisch verschachtelten Regelkreises zergliedert und beschrieben werden (Bernotat, 1970; Donges, 1982; Bubb, 1993b). Der Regelkreis besteht dabei aus den drei folgenden Stufen, die mitunter unbewusst durchgeführt werden:

- „Navigation“
- „Bahnführung“
- „Stabilisation“

Diese finden sich in Abbildung 6 wieder und werden nachfolgend erläutert. Eine Ergänzung dazu stellen die Ausführungen zur Abbildung 7 dar.

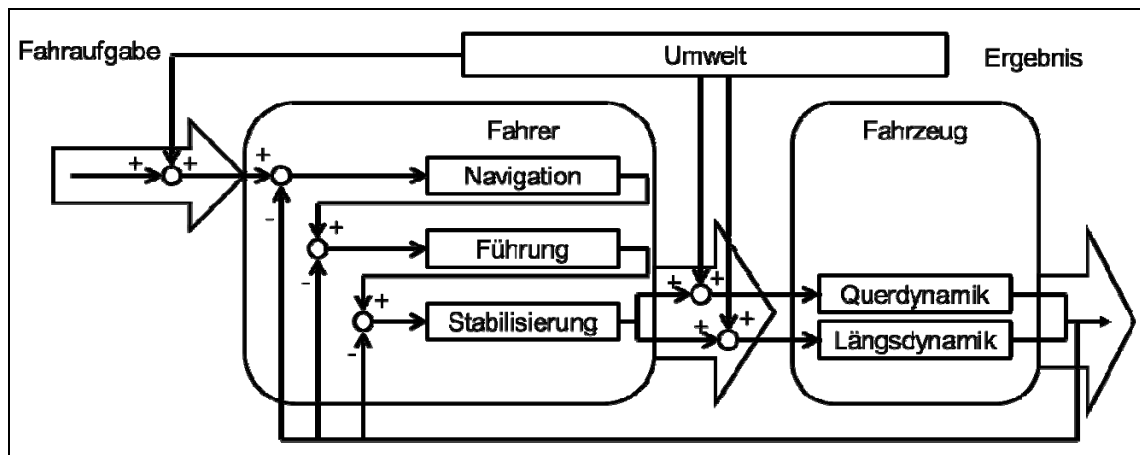


Abbildung 6: Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis mit den drei ineinander verschachtelten Ebenen der primären Fahraufgabe (Lange, 2008; modifiziert)

Die **Ebene der Navigation** (Abbildung 6) umfasst die Auswahl einer geeigneten Fahrtroute innerhalb des zur Verfügung stehenden Straßennetzes sowie die Abschätzung des voraussichtlichen Zeitbedarfs. Hinzu treten die Planung von Zielen sowie Transportmittel und die Kalkulation von Kosten- sowie Nutzenaspekten des Fahrens (Schlag, 1994b). Die Navigation ist somit als Stufe mit der höchsten Aufgabenkomplexität bei vergleichsweise geringer Frequenz der Tätigkeit anzusehen (Reichart & Haller, 1995).

Die hiervon abgeleiteten Daten über Kurs und Geschwindigkeit definieren die Aufgaben auf der **Führungsebene** (Abbildung 6). Beispiele hierfür sind Überholen, Vorfahrt beachten oder die Beachtung von Verkehrsregeln (Peters & Nilsson, 2007). Der auf dieser Ebene stattfindende

dende, kontinuierliche Prozess besteht darin, aus der Wahrnehmung der Verkehrssituation Führungsgrößen wie die Sollspur oder Sollgeschwindigkeit abzuleiten. Auf jener Basis wird dann antizipatorisch ein Regelungseingriff eingeleitet (vgl. Schlag, 1994b; Braess & Donges, 2006; Vollrath et al., 2006). Laut wissenschaftlichen Untersuchungen führt der Fahrer diese Aufgabe permanent innerhalb eines Zeitfensters von 2 sec für eine räumliche Distanz von 200 m durch (Rührmann & Bubb, 2006). Das Handeln ist zudem durch einen Abgleich zwischen den Zielen des Fahrers und den aktuellen Möglichkeiten geprägt (Schlag, 1994b).

Die niedrigste **Ebene der Stabilisierung** (Abbildung 6) bezieht sich letztlich auf die Kompensation von Abweichungen zwischen Führungs- sowie Istgrößen und geht ebenso mit konstanten Regelungsprozessen einher. Auf ihr findet demnach das unmittelbare Fahrzeughandling in Längs- und Querrichtung statt (Braess & Donges, 2006). Vorgaben für die Stabilisierung entstehen unter anderem aus der momentanen Fahrsituation und dem aktuellen Fahrmanöver (Vollrath et al., 2006). Die benötigten Regelungsprozesse laufen bei geübten Fahrern dabei weitgehend automatisiert ab (Schlag, 1994b). Wichtige Ergänzungen zu diesem Modell finden sich bei Braess und Donges (2006) sowie Donges (2009). Die Autoren nehmen hier zusätzlich zur Art der unterstützten Teilaufgabe eine Einordnung von FAS nach dem Kriterium der Zeit und nach menschlichen Verhaltensmustern vor. Braess und Donges (2006) weisen diesbezüglich den drei Ebenen ein zeitliches Merkmal im Sinne einer Antizipationsdauer für die Reaktion auf Gefahren zu (vgl. auch Schlag, 1994; Mäkinen et al. 2005; Peters & Nilsson, 2007). Aufgaben auf der Navigationsebene nehmen danach zumeist Minuten, Aufgaben auf der Führungsebene Sekunden und Aufgaben auf der Stabilisierungsebene Millisekunden in Anspruch.

Daneben wurde die **Drei-Ebenen-Hierarchie** mehrfach mit dem **Modell der Handlungsregulation** nach Rasmussen (1983) verknüpft (Bernotat, 1970; Donges, 1982; Schlag, 1994b). Dieser Ansatz eignet sich dabei besonders zur Beschreibung unterschiedlicher Phasen des menschlichen Lernverhaltens. Er beinhaltet eine dreistufige Unterteilung der kognitiven Inanspruchnahme des Menschen bei zielgerichteten Tätigkeiten und wurde auf die Führung von Kraftfahrzeugen übertragbar (Abbildung 7).

Laut dem Modell entwickeln sich auf der Ebene der Führung sowie Stabilisierung regel- und fertigkeitsbasierte Verhaltensmuster. Jene lassen sich auf der unbewussten, subkortikalen Ebene einordnen und sind durch gespeicherte Regeln (rule-based behaviour) oder reflexartige Reiz-Reaktions-Mechanismen (skill-based behaviour) charakterisierbar (vgl. Abbildung 7). Die Aktivierung des sogenannten wissensbasierten Verhaltens (knowledge-based behaviour), welches mit zeitintensiven Abwägungen von Handlungsalternativen einhergeht, tritt erst in kritischen Situationen oder bei Verkehrskonflikten außerhalb des erlernten Verhaltensrepertoires in Kraft (Rasmussen, 1983). Sie stellt daher analog zur Ebene der

Navigation (vgl. Abbildung 7) die höchsten Anforderungen an die Informationsverarbeitung und geht stets mit Bewusstsein einher.

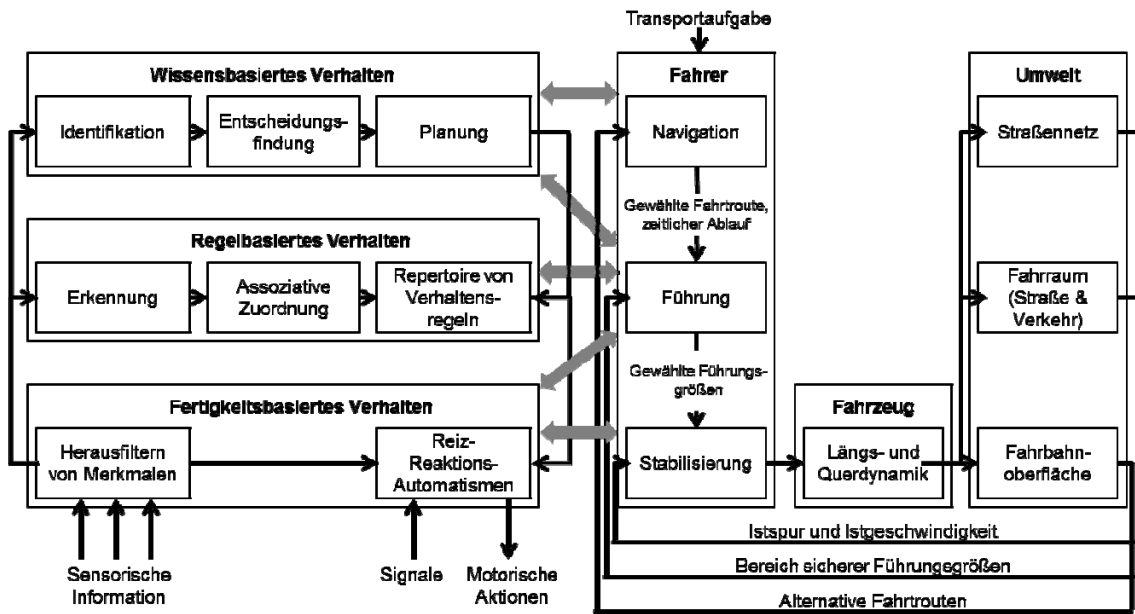


Abbildung 7: 3-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen (Rasmussen, 1983; links) und 3-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe (Donges, 1982; rechts) nach Donges (2009; modifiziert)

Mit Hilfe der beschriebenen Klassifikationsansätze lassen sich FAS also vorwiegend nach Teiltätigkeiten der Fahrerhandlung unterteilen (Buld, Tietze & Krüger, 2005) und mit handlungsregulatorischen Mechanismen verknüpfen. Differenzierungen nach dem **Grad der Unterstützung** bei der Fahraufgabe und die Zuordnung zu spezifischen Prozessen der Informationsverarbeitung sind nicht möglich. Derartige Anforderungen an ein Gliederungskonzept sind jedoch angesichts der benannten Weiterentwicklungen im Bereich Fahrerassistenz unabdingbar. So unterstützen die Fahrfunktionen den Fahrer in immer komplexer werdenden Fahrsituationen und nehmen ihm teilweise Handlungen ab. Daraus schlussfolgernd sind einerseits Klassifikationskonzepte unter Zuhilfenahme des Assistenz- bzw. Automatisierungsgrades (Sheridan, 1988; Naab & Reichart, 1994; Haller, 2001; Wallentowitz et al., 2001; Wörsdörfer & Maurer, 2003; Rabe, 2004; Stiller, 2005) vielversprechender. Gleiches gilt für Gliederungen nach der unterstützten Phasen des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses (Parasuraman, Sheridan & Wickens, 2000). Die Basis hierfür sind zu meist sogenannte Taxonomien der Automatisierung, auf die im Kapitel 3.1.2 genauer eingegangen wird. Eine Ergänzung dazu stellt der Assistenzwürfel von Wandke, Wetzenstein und Polkehn (2005) dar. Dieser ermöglicht eine Gliederung von Assistenzfunktionen nach sechs Handlungsphasen. Zudem unterscheiden die Autoren Assistenzfunktionen nach der nutzer-

seitigen Möglichkeit zur Anpassung der Systeme und nach derjenigen Instanz, welche die letzte Entscheidungsgewalt über die De- bzw. Aktivierung einer Funktion besitzt.

Da reale Fahrerassistenzsysteme in der Regel mehrere Funktionen umfassen sowie verschiedene Handlungsphasen betreffen, bietet eine **Unterscheidung von Automationsgraden** und damit der übernommenen Teilaufgaben der Fahrzeugführung eine bessere Strukturierungsgrundlage. Einen Beitrag hierzu liefert der Arbeitskreis „Automatisiertes Fahren“ mit Vertretern aus Industrie und Forschung (Gasser et al., 2012). Unter der Leitung der Bundesanstalt für Straßenwesen differenziert diese Nomenklatur zwischen fünf Automationsgraden der Fahrzeugführung (vgl. Abbildung 8). Beginnend bei der Stufe „Driver Only“, in der kein aktiver Systemeingriff erfolgt, erstreckt sich die Skala zunächst auf das Automationslevel mit dem Kürzel „Assistiert“. Hier führt der Fahrer dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung des Fahrzeugs aus (Gasser et al. 2012). Der jeweils andere Teil der Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen von einem Fahrerassistenzsystem (z.B. ACC) ausgeführt. Der Fahrer muss auf dieser Stufe das System dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein. In der nächsthöheren Kategorie „Teilautomatisiert“ (vgl. Abbildung 8) übernimmt das System die Quer- und Längsführung für einen definierten Zeitraum bzw. für spezifische Situationen. Die Überwachungsaufgabe verbleibt beim Fahrer. Ein Beispiel hierfür ist der Stauassistent, der im Niedriggeschwindigkeitsbereich auf der Autobahn in Längs- und Querrichtung des Fahrzeugs regelt. Systeme der Kategorie „Hochautomatisiert“ und „Vollautomatisiert“ setzten sich von der Stufe davor dadurch ab, dass die Übernahme durch den Fahrer erst nach einer gewissen Zeitreserve erfolgt. Zudem muss der Fahrer das System nicht dauerhaft überwachen (z.B. Staupilot). Im Fall der Vollautomatisierung besteht darüber hinaus die Forderung, dass das System in allen Situationen in der Lage ist, einen risikominimalen Systemzustand herzustellen (z.B. Nothalt).



Abbildung 8: Stufen des Automatisierten Fahrens (Gasser et al., 2012; modifiziert)

Geringfügige Erweiterungen des Ansatzes finden sich in der Darstellung des Verbands der Automobilindustrie (VDA). So wurde hier die Stufe „Fahrerlos“ hinzugefügt, welche einer Fahrt ohne Insassen entspricht. Größere Unterschiede bestehen zu Definitionen der Society of Automotive Engineers (SAE). Der Verband der Automobilingenieure benennt die Stufe nach der teilautomatisierten Fahrt mit „Conditional Automation“ (SAE, 2014). Sie entspricht der hochautomatisierten Fahrt aus Abbildung 8. Unter Berücksichtigung der nächstfolgenden SAE-Stufe namens „High Automation“ sind allerdings Verwirrungen in den Begrifflichkeiten

zu erwarten. Daher wird zumeist nur noch vom Automationslevel 0 (Driver only) bis 6 (Fahrerlos) gesprochen. Dabei ist zum einen zu berücksichtigen, dass sich die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA, 2007) dieser Definition noch anpassen muss. Zum anderen deckt die Strukturierung informierende oder nur warnende Systeme nicht ab.

Darüber hinaus existieren **technisch getriebene Ansätze**, welche die Einteilung der Fahraufgabe in Quer- und Längsführung strukturieren und diesen Kriterien die jeweiligen Fahrzeugkomponenten zuordnen (Bubb, 1993a; Flemisch, Vollrath & Rataj, 2007). Teilweise finden sich auch Differenzierungen nach Komfort- oder Sicherheitssystemen (Belz et al., 2004), obwohl beide Dimensionen mit ungleicher Gewichtung häufig in Kombination vorliegen (Fuhrmann, 2006) bzw. vom Fahrer zu gleichen Anteilen erwartet werden (Zittlau, 2006).

Die vorliegende Arbeit wird sich an der Klassifikation von Assistenz und Automation gemäß Abbildung 8 orientieren. Obwohl der Trend zur Nutzung der SAE-Skala geht, sieht die Autorin in der deutschen Begrifflichkeit und der Einfachheit der Einteilung eine bessere Grundlage für die Definition zugehöriger Fahrfunktionen dieser Arbeit.

#### **2.1.4 Perspektivische Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen**

Wie in den vorangegangenen Kapiteln geschildert, bieten Fahrerassistenzsysteme das Potenzial, das Fahrzeug mit autonomen Fähigkeiten auszustatten. Der Weg führt hierbei zum einen über technische Systeme, welche den Fahrer nur im Bedarfsfall unterstützen (z.B. Lane Departure Warning) oder ihm die Fahrt erleichtern (z.B. Kurvenlicht). Zum anderen fungieren Funktionen wie ACC und Heading Control als Plattform für das automatisierte Fahren (Maurer, 2009). Hierfür werden diese zukünftig mit Applikationsformen wie z.B. dem Kreuzungsassistent (Schulze et al., 2008) oder neuen Informations- und Kommunikationstechnologien verknüpft (Lindberg et al., 2009). Zudem besteht der Bedarf, die Fahreraufmerksamkeit und den Fahrerezustand im Fahrzeug zu überwachen (Wallentowitz, 2001).

In der Summe entwickeln sich die konventionellen FAS demnach zu so genannten ADAS (Advanced Driver Assistance Systems). Jene weisen neben dem Fokus auf Sicherheitsaspekten eine deutliche Zunahme der Funktionskomplexität auf (vgl. Abbildung 9). Sie betrachten ferner erstmal die Fahraufgabe in zweidimensionaler Form (Bubb, 1993).

Darüber hinaus zeichnen sich ADAS durch eine komplexere Signalverarbeitung und integrale Sicherheitsfunktionen aus. Mit Hilfe von Verfahren der Sensordatenfusion werden Kosten und Aufpreise für isolierte Anwendungen reduziert (Darms, 2009). Zudem können die von einem Sensor detektierten Informationen mehreren Systemen zur Verfügung stehen (Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski, 2009). Ein weiterer Nebeneffekt der Funktionsbündelung über die Sensoren ist die robustere Erfassung der Fahrzeugumgebung und der

Fahrsituation. Die damit einhergehende Systemzuverlässigkeit und -verfügbarkeit hat wiederum unmittelbare Auswirkungen auf die Nutzerakzeptanz (Helmer et al., 2008).

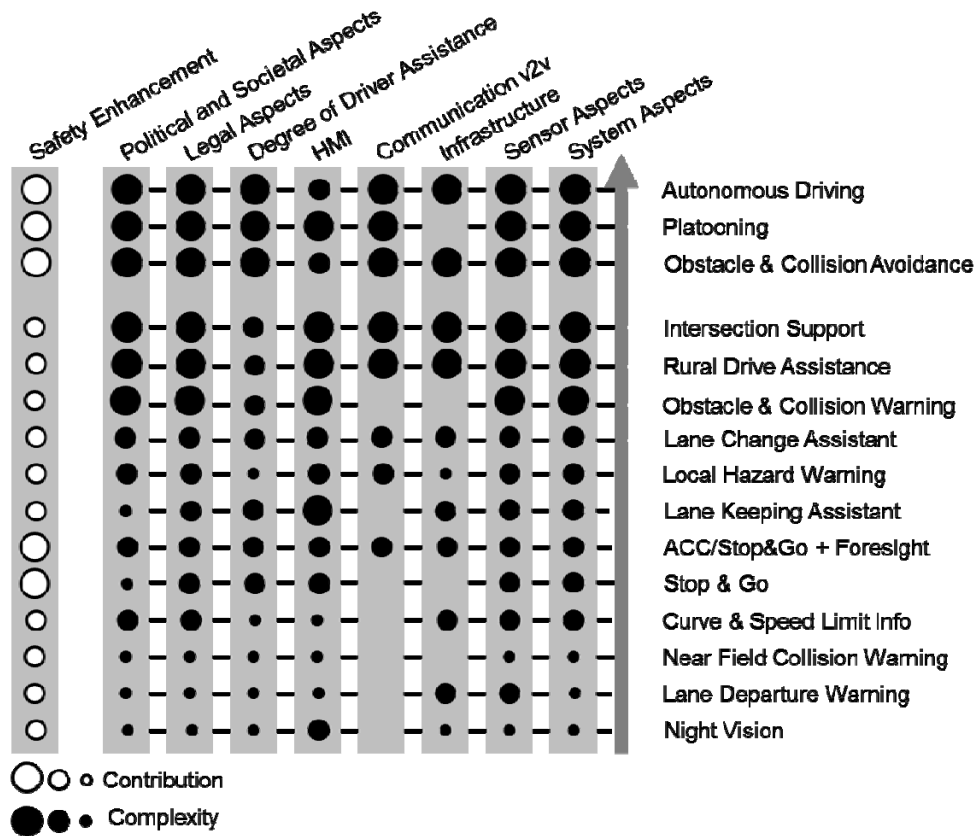


Abbildung 9: Roadmap zur Einführung von ADAS in Europa (Ehmanns & Spannheimer, 2004)

Des Weiteren binden ADAS teilweise eine vorausschauende Parametrierung der Betriebsweise von FAS unter Einbeziehung erweiterter Umfeldinformationen ein (Kastner et al., 2011). Die Kombination von quer- und längsregelnden Systemen führt zudem zu einem flüssigen Übergang in das teilautomatische Fahren (vgl. Abbildung 8). Nach der Autorin finden sich erste Analogien hierzu im Stauassistent von Mercedes (S-Klasse) und von BMW (BMW i3 oder BMW X5). Hersteller wie Audi, Volvo oder Ford werden in den kommenden Jahren folgen. Aus diesen Gründen ist der Weg zur Automation bereits eingeschlagen. Er erstreckt sich über die Integration von Einzelfunktionen (Kapitel 2.1.5) hin zu einem mehrstufigen Ansatz an Assistenz und Automation (Kapitel 2.1.6). Die beiden Grundlagenstränge werden vergleichbar zur Geschichte der autonomen Fahrzeugführung (vgl. Kapitel 2.1.1) durch zahlreiche Forschungsprojekte begleitet. Auf diese gehen die folgenden Abschnitte, parallel zu den zwei genannten Entwicklungssträngen ein.

### 2.1.5 Der Weg zur Automation I: Integration von Einzelfunktionen

Der Übergang von Assistenz zur Automation zeichnete sich bereits im Jahr 1999 mit dem Forschungsprojekt **S.A.N.T.O.S** (Situationsangepasste und Nutzertypzentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrunterstützung) ab (Weiße, 2002). Anstatt mehrerer Einzelsysteme wurde dem Fahrer hier ein integrierter Assistent angeboten, der neben einer Navigation, einem Mobiltelefon sowie einem Radio eine Kombination aus ACC und Heading Control beinhaltet. In Analogie dazu setzte sich die Erforschung der Wirkung von längs- und quergeregelten Systemen in „**EMPHASIS**“ (Effort-Management und Performance-Handling in sicherheitsrelevanten Situationen) in Form eines Autopiloten fort (Buld & Krüger, 2002) und entwickelte sich in EU Projekten wie „**AKTIV**“ (Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr; Scholl, 2007) oder „**HAVE-IT**“ (Highly automated vehicles for intelligent transport; Flemisch, 2009) weiter. Auffällig ist hier bereits, dass im Gegensatz zu den historischen Aktivitäten (Kapitel 2.1.1) der Hauptfokus mehr auf der Mensch-Maschine-Schnittstelle liegt (vgl. Projekte wie „SPARC“ in Holzmann et al. 2005; „CityMobil“ in Martens et al., 2007; „PREVENT“ in Scholliers et al., 2008; „AIDE“ in Kussmann, 2010). So münden beispielsweise Ansätze einer kooperativen Fahrzeugführung (Hakuli et al., 2009), in der sowohl der Fahrer als auch die Automation gemeinsam die Fahrzeugführungsaufgabe übernehmen, in Konzepte wie **Conduct-by-Wire** (Vanholme et al., 2011; Glaser et al., 2012) und **H-Mode** (Flemisch et al., 2003; Bauer et al., 2012). Des Weiteren werden erste Anzeige- und Bedienkonzepte im Sinne eines ganzheitlichen Systems entwickelt. Projekte wie **interactive** (accident avoidance by active intervention for intelligent vehicles; Hesse et al., 2011) oder **UR:BAN** (Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement; Petermann & Rhede, 2013; Winkler, Kazazi & Vollrath, 2014) versuchen diesbezüglich durch generische Ansätze, das Verständnis der Fahrer bei der Nutzung von ADAS zu erhöhen. Weiterhin widmet man sich vermehrt Fragestellungen, welche die Erhöhung des Bewusstseins des Fahrers für den jeweiligen Assistenz- bzw. Automatisierungsgrad betreffen. Dies findet gleichzeitig sowohl für assistierte (Helmer et al., 2008; Rhede, Wäller & Oel, 2011), teilautomatisierte (Schaller, Schielen & Gradenegger, 2008; Othersen, Hackenberg & Petermann-Stock, 2013; Beukel & Voort, 2014) als auch hochautomatisierte Systeme (Heesen et al., 2010; Schieben et al., 2010) statt. Dementsprechend beschäftigt man sich bereits mit einem **mehrstufigen Betrachtungsansatz von Assistenz und Automation**, welcher Resultat des eingeschlagenen Wegs der Synthese von Fahrerassistenzsystemen ist. Der Fahrer interagiert zukünftig mit einer Bandbreite an unterschiedlich stark unterstützenden Fahrfunktionen im Fahrzeug. Damit zusammenhängend ergeben sich weitere Gesichtspunkte, die Bestandteil des folgenden Abschnitts sind.

### 2.1.6 Der Weg zur Automation II: Mehrstufige Einbettung von Assistenzfunktionen

Aus den vorherigen Betrachtungen wird deutlich, dass Assistenz und Automation eine ineinander übergehende Entwicklung zeigen. Die Teilfunktionen münden in einen kontinuierlichen Wechsel zwischen vollständig manueller und völlig automatisierter Fahrzeugführung (Flemisch et al., 2008). Aktuelle Forschungsprojekte wie **AdaptIVe** (Automated Driving Applications and Technologies for Intelligent Vehicles; Eickmeyer-Hehn, 2014) setzen auf diesen Entwicklungen auf. So wird hier versucht einen idealen Grad der Fahrzeugautomation in Abhängigkeit der jeweiligen Fahrsituation zu bestimmen. Das Projekt adressiert zudem sowohl das teil- als auch das hochautomatische Fahren. Im Bereich der Mensch-Maschine Interaktion stehen dabei Fragen rund um das Thema „Übernahmezeiten des Fahrers aus der automatischen Fahrt“ im Vordergrund (vgl. Damböck et al., 2012; Gold et al., 2013; Petermann-Stock et al., 2013). Damit wird ein Themengebiet aufgegriffen, welches bereits bei konventionellen Fahrerassistenzsystemen betrachtet wurde (Nirschl & Kopf, 1997; Stanton & Young, 1998; Weinberger, 2001; Lindberg, Schaller & Gardenegger, 2007). Aus Sicht der Autorin der vorliegenden Arbeit bestehen die Anforderungen des Fahrers aber nicht nur durch seine Funktion der Rückfallebene (vgl. Code of Practice in PReVENT, 2006). Sie sind besonders dadurch gegeben, dass er innerhalb der Vielfalt an Automation Systemverhaltensweisen unterschiedlichster Fahrfunktionen und deren Abhängigkeiten untereinander verstehen muss (vgl. Kapitel 3.2). Zudem ergeben sich aufgrund der jeweiligen Systemgrenzen dynamisch wechselnde Automatisierungsgrade. Diese sind mit unterschiedlich komplexen Übergangssituationen, sogenannten **Transitionen**, verbunden (vgl. Kapitel 3.2.2). Sie betreffen damit die optimale Verteilung der Aufgaben zwischen Fahrer und Automation (vgl. Löper, Kelsch & Flemisch, 2008; Winner & Wolf, 2009a; Schieben et al., 2010). Sie definieren Situationen, die mit fahrerseitigen Übergaben an die Automation sowie systemseitigen Rückgaben der Kontrolle in Richtung des Fahrzeugführers charakterisiert sind (vgl. Kapitel 4.2.4). Aus psychologischer Sicht bedarf es hier einer Grundlagenforschung dazu, wie viele und welche Stufen an Automation der Fahrer überhaupt differenzieren kann. Hierbei muss zudem Bezug zu Erkenntnissen der Automationsforschung aus anderen Bereichen genommen werden. So finden sich demgemäß im Luftfahrtkontext nicht intendierte Nebeneffekte einer Synthese von Assistenz und Automation in Form eines geringen Systemverständnisses, mangelnder Transparenz der Automationseingriffe und verwechselter Systemzustände (vgl. Endsley & Kiris, 1995; Sarter & Woods, 1995; Scerbo, 1996; Billings, 1997; Sheridan & Parasuraman, 2006). Im Kern steht dabei die Frage, weiß der Nutzer zu jeder Zeit, wer, was, wie tut. Aufgrund der bisher eher geringen Erkenntnislage zu diesem Forschungsgegenstand (Schieben & Flemisch, 2008; Schömig & Kaussner, 2010), soll er zentraler Bestandteil der vorliegenden Arbeit sein. Das Augenmerk liegt dabei sowohl auf zukünftigen Automatisierungsgraden als auch auf Übergängen dazwischen (vgl. Kapitel 4).



Zusammenfassend weist das Kapitel 2.1 anhand der Geschichte und Zukunft der Automation auf einen mehrstufigen Betrachtungsansatz von Assistenz und Automation hin. Er führt zu gleichzeitig im Fahrzeug verfügbaren Fahrfunktionen, die den Fahrer unterschiedlich von der Fahraufgabe entbinden und in vielfältigen Übergabe- sowie Übernahme-situationen fordern werden. Neben den daraus resultierenden Forschungsaktivitäten zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ergeben sich gleichfalls Fragen, die die Rahmenbedingungen für Automatisierung im Fahrkontext betreffen: Wo liegt der Bedarf des Fahrer?, Wollen die Fahrer automatisiert fahren?, Wie sehen die Diskussionen auf politischer, wirtschaftlicher und rechtlicher Ebene aus? Diesen Fragen widmet sich das folgende Kapitel 2.2.

## **2.2 Rahmenbedingungen für Automatisierung im Fahrkontext**

Moderne Fahrerassistenzsysteme sollten primär mit dem Ziel entwickelt werden, Diskrepanzen zwischen den Anforderungen der Verkehrssituation und dem Leistungsvermögen des Fahrers zu beseitigen (Fuller, 2005). Grundlage hierfür können Erkenntnisse über die Entstehungsbedingungen von menschlichem Fehlverhalten im Straßenverkehr sein, deren Aufschlüsselung anhand von Unfalldatenanalysen möglich ist (Treat, 1977; Reason, 1990). Kapitel 2.2.1 stellt diesbezüglich unfallverursachende Faktoren vor, welche eine Ableitung des fahrerseitigen Bedarfs an Assistenz bzw. Automation zulassen. In Ergänzung dazu unterstreicht der folgende Abschnitt 2.2.2, dass sich auch die Wahrnehmung und Akzeptanz von Unterstützungssystemen im Fahrzeug beim Nutzer verändert. Dies betrifft gleichfalls infrastrukturelle Anforderungen für den zukünftigen Anwendungskontext. Bedenken bestehen jedoch nach wie vor bezüglich der Einordnung zunehmender Automatisierung in das Straßenverkehrsrecht (Kapitel 2.2.3).

### **2.2.1 Kriterien aus unfalltheoretischer Sicht**

Obwohl sich der Mensch gegenüber technischen Systemen durch effiziente Wahrnehmungsprozesse sowie flexibles Handeln auszeichnet, gehört das menschliche Fehlverhalten zu den häufigsten Unfallursachen im Straßenverkehr (Treat, 1977; Woods et al., 1994). So weisen Unfallanalysen der German In Depth Accident Study (GIDAS Datenbank) daraufhin, dass 93,5 % der Unfallursachen auf den **Faktor Mensch** zurückzuführen sind. Technische Mängel am Fahrzeug, schlechte Straßen- und Witterungsverhältnisse bzw. Hindernisse auf der Fahrbahn haben demgegenüber einen weitaus geringeren prozentualen Anteil (Elvik & Vaa, 2004; Briest & Vollrath, 2006). Demzufolge bedarf es einer differenzierten **Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit**, die bereits in anderen Bereichen wie der Luftfahrt (Sarter & Woods, 1992, 1994), der Schifffahrt, der Medizin (Cook et al., 1991) oder der Atomindustrie (Woods, O'Brien & Hanes, 1987) an eine lange Tradition anknüpft. Neben der Erstellung verschiedener Fehlerbaumtechniken wie FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse)

oder HEP (Human Error Probability) sind hierbei vor allem psychologischen Entstehungsmechanismen für Fehlhandlungen in den Vordergrund gerückt (Ranney, 1994). Jene beruhen auf motivationalen Modellen (Näätänen & Summala 1976; Wilde, 1982), Informationsverarbeitungsmodellen (Broadbent, 1958; Rumar, 1985; Wickens, 1984, zitiert nach Wickens & Holland, 2000), hierarchischen Kontrollmodellen (Schlag, 1994b; Fuller, 2005) oder Fehlermodellen (Rasmussen, 1982; Reason, 1990; Hacker, 1998). Viele dieser Ansätze stellen dabei einen direkten Bezug zwischen den **Fehlhandlungen** und den Prozessen der **Informationsverarbeitung** sowie **Handlungsregulation** im Sinne der Planung bzw. Ausführung von Aktionen her (Vollrath et al., 2006). Dabei darf die moderierende Wirkung höherer kognitiver Funktionen nicht außer Acht gelassen werden (Rumar, 1985). So können spezielle Motive der Fahrzeugführer oder ihre Fahrerfahrung psychologische Mechanismen der Erwartungs- und Aufmerksamkeitsausrichtung entscheidend determinieren (Näätänen & Summala, 1976; Schlag, 2008; Fuller, 2005). Staubach (2009) stellt diesbezüglich ein Klassifikationsschema für die psychologische Analyse von Fahrfehlern vor, welches sich an die verhütungsbezogene Einteilung von Fehlhandlungen nach Hacker (1998) anlehnt und auf den Verkehrskontext adaptiert wurde. Eine Befragung von  $N = 343$  Unfallverursachern führte zu der in Abbildung 10 dargestellten Verteilung der häufigsten Einflussgrößen über alle Unfalltypenkategorien hinweg. Daraus geht hervor, dass sich die Defizite des Fahrers primär in der Aufnahme, Verarbeitung und Umsetzung von Informationen beim Führen eines Fahrzeuges manifestieren (Gelau & Bauer, 2004; Gründl, 2005). Sie sind zudem häufig durch Unaufmerksamkeit, Müdigkeit oder falsche Situationseinschätzungen bzw. Erwartungsbildung bedingt (Rumar, 1985; Hacker, 1998).

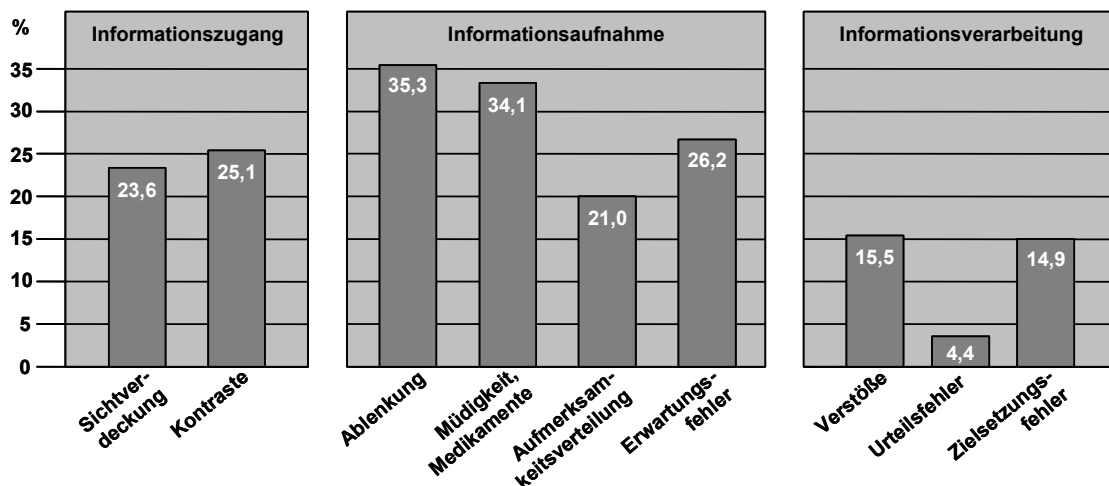


Abbildung 10: Prozentualer Anteil der häufigsten Einflussfaktoren über alle Unfalltypenkategorien für  $N = 343$  befragte Unfallverursacher (Staubach, 2009; modifiziert)

Zukünftige Sicherheitssysteme im Fahrzeug sollten genau diese Defizite im menschlichen Informationsverarbeitungsprozess adressieren (Abendroth & Bruder, 2009). Eine derartige Zielerreichung kann durch Potentialausschöpfungen auf dem Gebiet der **passiven und aktiven Sicherheit** erfolgen (vgl. Abbildung 11).

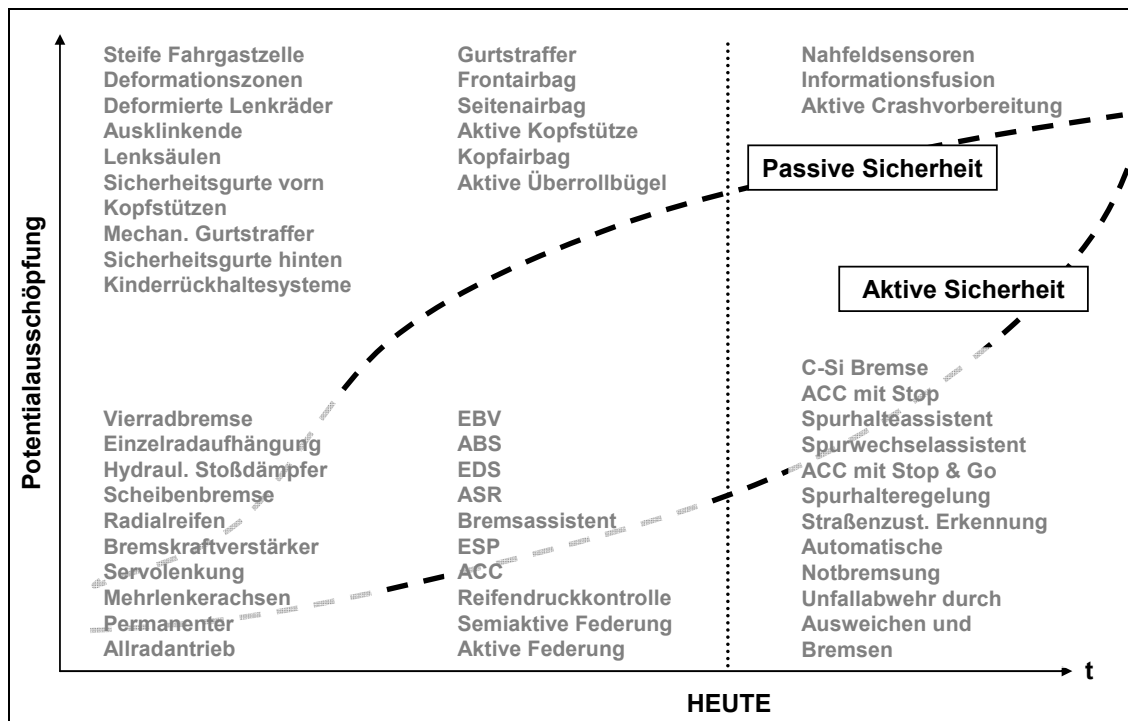


Abbildung 11: Potentialausschöpfung der aktiven und passiven Sicherheit (Heißing, 2006; modifiziert)

Gemäß Abbildung 11 zeigt sich allerdings, dass passive Maßnahmen ihre Möglichkeiten nahezu ausgenutzt haben (Lange, 2008). Aktive Sicherheitssysteme wie das ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm) bieten heutzutage mehr Potential, um den degressiven Verlauf passiver Sicherheitsmaßnahmen auszugleichen (Brhning & Seeck, 2006). Dazu zählen auch die in Kapitel 2.1.2 beschriebenen, aktuellen Fahrerassistenzsysteme.

Kombiniert man die Inhalte der Abbildungen 10 und 11 miteinander, liegt der fahrerseitige Bedarf an Assistenzsystemen zum einen auf der Seite der **Informationsaufnahme**. Die hierbei dominierenden Einflussgrößen für Unfälle sind gemäß Staubach (2009):

- Reizmaskierungen (v. a. Blendung, Dunkelheit)
- Ablenkung und Unaufmerksamkeit
- Falsche Aufmerksamkeitsausrichtung
- Aktivierungsdefizite (v. a. Medikamentenkonsum)

Sicherheitspotentiale ergeben sich somit z.B. für informierende und warnende Kreuzungs- sowie Abbiegeassistenten, welche die Fahreraufmerksamkeit gezielt lenken (Vollrath et al., 2006). Zudem sind hierbei (teil-)automatisierte Notbremseingriffe bei ausbleibenden oder verzögerten Reaktionen denkbar. Eine Kommunikation über Vehicle-to-X oder gezielte Lichtverteilungen auf der Straße könnte daneben die Vorausschau des Fahrers verbessern. Dazu sind Systeme der Fahrerzustandsüberwachung geeignet, um Müdigkeit oder Ablenkung zu detektieren und warnende Funktionen gezielt anzupassen.

Andererseits bedarf es dem Ausgleich von menschlichen Defiziten, welche infolge der ausbleibenden bzw. falschen Nutzung von Informationen zu einer fehlerhaften **Informationsverarbeitung und Handlungsumsetzung** führen (Hacker, 1998). Diesbezüglich werden oft tödliche Fahrnfälle und Unfälle im Längsverkehr dokumentiert (Lange, 2008). Relevante Einflussfaktoren sind hierbei:

- Aktivierungsdefizite (v. a. Ermüdung, Herzinfarkt)
- Ablenkung und Unaufmerksamkeit
- Erwartungsfehler (v. a. Straßenverlauf und -zustand)
- Verstöße (v. a. zulässige Höchstgeschwindigkeit)
- Handlungs- und Zielsetzungsfehler (z.B. übertriebene Lenkbewegungen)

Laut Staubach (2009) treten dabei Aktivierungsdefizite, Erwartungsfehler und Zielsetzungsfehler überzufällig häufig gemeinsam auf. Eine Folge dessen sind zumeist Fehler in der Geschwindigkeits- und Abstandshaltung sowie ein unbeabsichtigtes Verlassen der Fahrspur (StatBA, 2009). Sicherheitspotentiale werden demnach durch Systeme geschaffen, welche die Wahl einer angemessenen Geschwindigkeit unterstützen, Sollabstände einhalten, bei der Spurhaltung assistieren, eine Vorausschau ermöglichen und ein Abkommen von der Fahrbahn verhindern (Vollrath et al., 2006; Lange, 2008).

Konventionelle FAS wie das ACC oder Spurhalteassistenten adressieren bereits diesen menschlichen Defizitbereich (vgl. Kapitel 2.1.2). Sie zeigen allerdings auch, welche Potentiale zukünftige ADAS bieten, die teil- bzw. vollautomatisiert agieren (Gayko, 2009; Winner & Wolf, 2009b). Allerdings adressieren diese neuartigen Fahrfunktionen bisher eher Oberklassefahrzeuge. Diese werden überwiegend von 40- bis 60-Jährigen gekauft, welche die Systeme unfallstatistisch gesehen jedoch am wenigsten benötigen (Lange, 2008). So treten gerade bei jungen Fahrern (18 bis 25 Jahre) motivationale Faktoren als moderierende Einflussgrößen auf das Unfallgeschehen in den Vordergrund (Keskinen, 1996; Stern & Schlag, 2001). Jene führen zu einer höheren Risikoakzeptanz im Straßenverkehr (Schlag, 1986; Hatfield & Fernandes, 2009) und münden zumeist in Unfälle, die auf Grund von Erwartungs-

fehlern oder Geschwindigkeitsverstößen ein Abkommen von der Fahrbahn bedingen (Cohen, 1994; Clarke et al., 2006). Zudem steigt die Unfallwahrscheinlichkeit ab 60 Jahren erneut an. Dies geht primär auf Einschränkungen im Wahrnehmungs- bzw. Reaktionsvermögen sowie im Bewegungsapparat zurück (Schlag, 1993; Hong, Kurihara & Iwasaki, 2007; Fastenmeier & Gstalter, 2008). Sie hängt außerdem mit der Einnahme von blutdrucksenkenden Mitteln (McGwin et al., 2000) und der prozentual häufigeren Fahrten Älterer in Situationen mit erhöhtem Unfallrisiko zusammen (Vollrath, 2007). Damit die Sicherheitspotentiale von Systemen der aktiven Sicherheit zukünftig umfassend ausgeschöpft werden, müssen demgemäß auch diese Altersgruppen in Markteinführungsstrategien Berücksichtigung finden.

### 2.2.2 Kriterien aus nutzerbezogener und infrastruktureller Sicht

In Relation zum vorangegangenen Kapitel können zukünftige ADAS wesentlich zur Unfallvermeidung beitragen. Allerdings entscheidet letztlich der Kunde darüber, ob ein Produkt am Markt abgesetzt werden kann. Die frühzeitige Einbindung potentieller Nutzer in den Innovationsprozess trägt somit dazu bei, marktfähige Lösungen zu finden und Fehlentwicklungen zu vermeiden (Gruner, 1997; Jenner, 2000). Betrachtet man die **heutigen Kundenansprüche**, bestehen diese nicht mehr allein in dem Wunsch, dass Fahrzeug als reines Transportmittel zu nutzen (Schlag, 1994a). Es geht vielmehr darum, den eigenen Lebensstil abzubilden und einen gewissen Status zu repräsentieren (Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski, 2009). So haben sich gewisse „Must Haves“ herausgebildet, die u. a. mit Streben nach Komforterhöhung und Vereinfachung einhergehen (Abbildung 12).

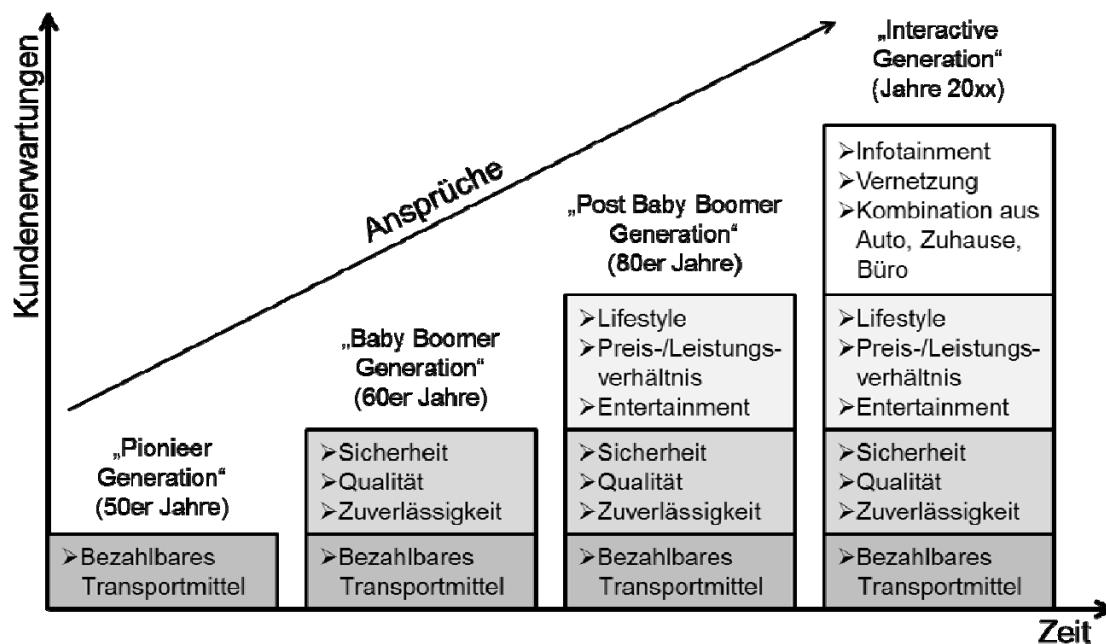


Abbildung 12: Veränderung der Kundenansprüche (Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski, 2008; modifiziert)

Jene Wünsche spiegeln sich auch in Ergebnissen von **Nutzerbefragungen** und empirischen Untersuchungen zur Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen wider (vgl. Beier, Enigk & Renner, 2002; Schierge, 2005; Kassner & Vollrath, 2006; Zwerschke, 2006). Hier zeigt sich, dass assistierende sowie handlungsersetzende Systeme infolge der subjektiv wahrgenommenen Komforterhöhung mit positiven Systembewertungen einhergehen (vgl. Becker, Sonntag & Krause, 1992; Brockmann et al., 1995; Nirschl & Kopf, 1997; Weinberger, 2001; Buld & Krüger, 2003; Feenstra & Van der Horst, 2006). Dabei wirken sich insbesondere die Automation der Spurhaltung sowie die Verschränkung von Quer- und Längsführung begünstigend auf die Fahrerbeanspruchung und Systembeurteilung aus (Stanton & Young, 1998; Buld et al., 2002). Der Gewinn an Fahrkomfort, die Fahrerentlastung und das Bewusstsein für das Potential der Systeme, die Unfallwahrscheinlichkeit zu verringern, sind zudem Hauptkaufgründe (Zwerschke, 2006). Demgemäß zeigt eine Umfrage des VDI (Verein Deutscher Ingenieure), das 47,2 % der Befragten der Meinung sind, dass sich das hochautomatische Fahren auf Autobahnen flächendeckend bis 2030 durchsetzen wird (Rittermeier, 2014). Sie weist gleichfalls darauf hin, dass eine zunehmende Automatisierung von Fahrfunktionen nur für **ausgewählte Anwendungskontexte** sinnvoll ist (vgl. Grimmer, Adelt & Stephan, 1995; Schierge, 1995; Fancher et al., 1998; Beier et al., 2002; Lindberg, Schaller & Gardenegger, 2007). Jene betreffen beispielsweise Fahrten im Stau, die infolge der monotonen Tätigkeit zur Unterforderung des Fahrers führen (Richter & Hacker, 1998; Fuller, 2005) und sich in Form von Müdigkeit und Langeweileempfinden ausdrücken (Hoyos, Fastenmeier & Gstalter, 1995; Hockey, 1997). Vergleicht man die Präferenzen der Kunden für höher automatisierte Systeme mit denen für vollautomatisierte Eingriffe (z.B. Notbremsungen), werden hingegen derartige Übernahmen der Fahrzeugkontrolle nur in akuten Kollisionssituationen akzeptiert (Bender & Landau, 2006; Lindberg et al., 2009). Hier liegt zumeist eine Fahrsituation vor, deren Aufgabenschwierigkeit die Handlungsfähigkeiten bzw. subjektiven Bewältigungsmöglichkeiten des Fahrers übersteigt (vgl. Task-Capability Interface Model nach Fuller, 2005). Eine frühe Information des Fahrers mit angemessener Warnung oder Hinweisen zur korrekten Handlungsausführung sind hier sinnvoll (Vollrath, 2006).

Der **Einsatzbereich zukünftiger ADAS** muss sich gemäß diesen Nutzererwartungen am speziellen Anwendungsfall orientieren. Jener fordert in Abhängigkeit der Fahrerbeanspruchung, der Fahrerleistung und der Schwierigkeit der Fahraufgabe einen unterschiedlich starken Automatisierungsgrad (vgl. Fancher & Ervin, 1998; Beier, Boemak & Renner, 2001; Zimmer, 2009). Assistierende Systeme sind demgemäß eher in komplexen Fahrsituationen sinnvoll, in denen zumeist eine Überforderung des Fahrzeugführers vorliegt. ADAS mit höher automatisierten Fahrfunktionen sollten hingegen eher einfache, monotone Fahrsituationen adressieren. Abbildung 13 fasst diese Trennung zwischen Assistenz und Automation in ver-

einfacher Form nochmals zusammen. Dafür ist auf der Abszisse der Abbildung 13 der Schwierigkeitsgrad der Fahraufgabe abgetragen, der typischerweise mit der Komplexität der Fahrsituation einhergeht (Fastenmeier, 1995). Die linke Ordinate visualisiert die Fahrerleistung, welche in geringer Ausprägung durch eine Zunahme an Fahrfehlern und somit erhöhter Unfallwahrscheinlichkeit gekennzeichnet ist. Die rechte Ordinate repräsentiert hingegen die Höhe des Unterstützungsbedarfs.

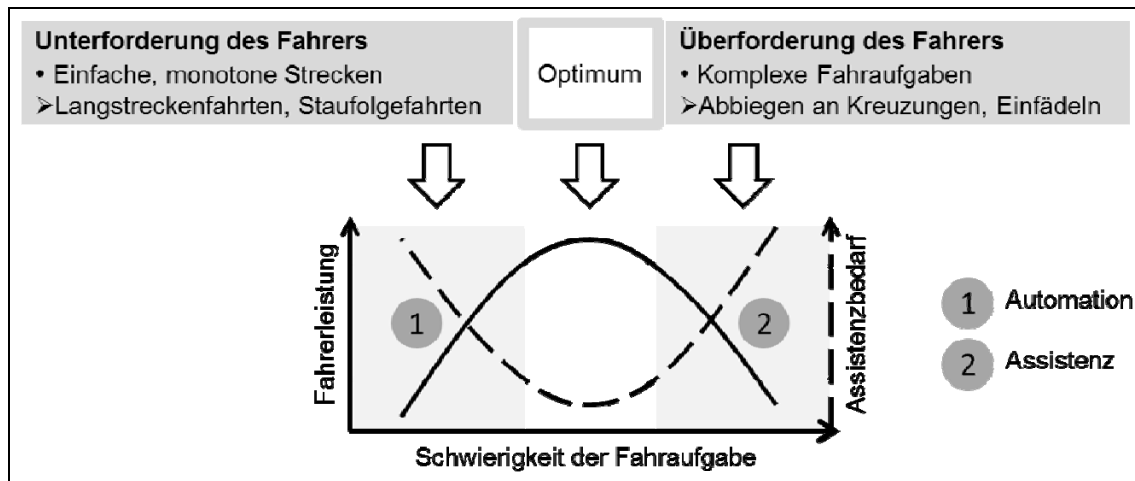


Abbildung 13: Abgrenzung Automation und Assistenz (Lienkamp & Bartels, 2009; modifiziert)

Erweiterungen der Strukturierung aus Abbildung 13 zeigen Forschungsfahrzeuge aus Projekten wie Stadtpilot der Technischen Universität Braunschweig im Jahr 2013 oder die Flotten von Google Inc. So adressieren diese auch komplexe Fahrsituationen im städtischen Verkehr. Sie gehen demnach über Funktionsanforderungen hinaus, die im Kontext von deutschen Autobahnen relativ leicht zu definieren sind (vgl. Bartels, 2008; Weiser et al., 2009). So finden sich auf Autobahnen sehr strukturierte und vergleichsweise einfache Fahrumgebungen mit hoher Systemverfügbarkeit. Die Fahrspuren sind gut gekennzeichnet sowie ausreichend breit. Der Gegenverkehr ist durch bauliche Maßnahmen wie z.B. Leitplanken abgeschirmt. Es gibt keine Ampeln, Kreuzungen oder Fußgängerüberwege wie in der Stadt. Trotz technischer Weiterentwicklungen, bleibt daher dieser Anwendungskontext auch in naher Zukunft der erste Einsatzbereich höher automatisierter Fahrfunktionen (Woods et al., 1994). Die nächsten Entwicklungsschritte werden nicht das „Automatische Fahren“ hervorbringen, sondern viele Teilfunktionen erzeugen, die in verschiedenen Verkehrssituationen einen unterschiedlichen Grad der Automatisierung ermöglichen (Lienkamp & Bartels, 2009). Dabei wird auf weitere infrastrukturelle Maßnahmen wie Sonderfahrspuren (vgl. Özgüner et al., 1997; Ioannou, 1997; Deutsche, 2006; Toffetti et al., 2009) verzichtet. Dies entspricht Untersuchungsergebnissen, die zwar auf eine generelle Akzeptanz derartiger Umsetzungslösungen hindeuten, jedoch ebenso Schwierigkeiten in der Nachvollziehbarkeit der Aktivierungsvoraussetzungen auf Sonderfahrspuren betonen (Schieben & Flemisch, 2008).

### 2.2.3 Kriterien aus rechtlicher Sicht

Auf dem Weg von Assistenzfunktionen zu Systemen, die eine immer größere Eingriffsstärke aufweisen, besteht eine weitere Rahmenbedingung in Form der **Zulassung zum Straßenverkehr**. Rein informierende oder in übersteuerbarer Weise aktiv eingreifende FAS erregen dabei in den meisten Fällen keine Bedenken bezüglich der Einordnung in das Straßenverkehrsrecht (Gasser et al., 2012). Es sind eher diejenigen Systeme, welche infolge der Verschiebung der technischen Grenzen nicht mehr nur mittelbar, sondern auch unmittelbar auf die Fahrzeugführung sowie -steuerung wirken. Entscheidende Bedeutung hat in diesem Zusammenhang das **Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr** von 1968 (WÜ, Kempen, 2008) erlangt (vgl. Code of Practice in PREVENT, 2006). Dieser Vertrag ist Grundlage zahlreicher nationaler Vorschriften im Bereich des Straßenverkehrsrechts. Er verpflichtet die Vertragsstaaten, nationale Regelungen im Bereich des Straßenverkehrs im Einklang mit den völkerrechtlichen Vorgaben aufzubauen (Albrecht, 2005; Bewersdorf, 2005). Artikel 8 Abs. 1 und 5 des WÜ-StV sind für die Art der Unterstützung durch Fahrerassistenz relevant. Sie beinhalten, dass jedes Fahrzeug einen Führer haben muss, der es dauernd beherrscht. Jene Forderung wird durch den Artikel 13 Abs. 1 noch wie folgt betont: „Jeder Fahrzeugführer muss unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen, um den Sorgfaltspflichten genügen zu können und um ständig in der Lage zu sein, alle ihm obliegenden Fahrbewegungen auszuführen.“ Diese eher weite Regelung wird erst dann verletzt, wenn aktiv eingreifende Systeme nicht mehr übersteuerbar sind und/oder im Widerspruch zum Fahrerwillen stehen (Gasser et al., 2012). So würde eine vollautonome Notbremsfunktion, die dem Fahrer kein Alternativverhalten (z.B. Ausweichen) mehr ermöglicht aus rechtlicher Sicht kritisch bewertet werden (Feldges & Kanz, 2002). Eine vergleichbare Situation ist gegeben, wenn der Fahrer infolge des erreichten Automatisierungsgrads soweit aus dem Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis entbunden wurde, dass eine Fahrzeugbeherrschung seinerseits nicht mehr realistisch ist (Gasser et al., 2012). Dies betrifft vor allem automatische Fahrfunktionen, welche dem Fahrer Nebentätigkeiten während der Fahrt erlauben. Daher haben sich Arbeitsgruppen und runde Tische zum automatischen Fahren gebildet, in denen Automobilhersteller gemeinsam mit Versicherungsunternehmen und Juristen versuchen, den gesetzlichen Rahmen anzupassen. Erste Erfolge bei der Auslegung des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr sind dadurch erreicht worden (vgl. Gasser, 2013) – ein Änderungsvorschlag liegt vor.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass laut §1 des **Produkthaftungsgesetzes** der Hersteller erst dann zum Schadensersatz verpflichtet ist, wenn ein Schaden durch ein fehlerhaftes Produkt oder Teilprodukt entsteht (Gasser et al., 2012). Ein Verschulden des Herstellers ist dabei nicht notwendigerweise impliziert (Katzenmeier, 2003), da gemäß § 823 Abs. 1 Bundesgesetzbuch (BGB) die Beweislast stets auf der Seite des Geschädigten



liegt (Lutz, 2014). So gehen entsprechend der **Halterhaftung** auch Fehlfunktionen bzw. ein unsachgemäßer Gebrauch von Fahrerassistenzsystemen zu Lasten des Fahrzeughalters (§7 StVG). Dies ist ebenso für Fahrfunktionen zutreffend, die nicht übersteuert werden können (König, 2009).

Tatsache ist, dass das erwartete Risiko der betroffenen Verkehrsteilnehmer durch eine automatisierte Fahrzeugführung nicht höher als das Vergleichsrisiko des jeweiligen Istzustands sein darf (Homann, 2005). Daneben muss die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen auch unter Einhaltung technischer **Normen** und gesetzlicher Sicherheitsbestimmungen erfolgen. Für höher automatisierte Fahrfunktionen stehen hierbei vor allem die **ISO CD 22179** (Full Speed Range ACC), die **ISO CD 17361** (LDW Systeme) und die **ECE-R 79** (Lenkanlagen) sowie **ECE-R 48** (Anbau Lichttechnik) der Economic Commission for Europe zur Diskussion (Gelau, Gasser & Seeck, 2009). So besagt beispielsweise die ECE-R 79: Sobald die automatische Lenkfunktion einsatzbereit ist, muss dies dem Fahrzeugführer angezeigt werden, und die Steuerung muss automatisch ausgeschaltet werden, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit den eingestellten Grenzwert von 10 km/h um mehr als 20 % überschreitet oder die auszuwertenden Signale nicht mehr empfangen werden (Ebner, 2013). Die Einhaltung dieser Vorschrift wird beispielsweise von heutigen Parklenkassistenten (z.B. Park Assist von Volkswagen) erfüllt, ist jedoch für zukünftige automatisierte Systeme im höheren Geschwindigkeitsbereich schwer erreichbar. Folglich müsste zunächst eine Änderung der Normen erfolgen, um ADAS mit hohem Automatisierungsgrad zu zulassen. Tom Gasser von der Bundesanstalt für Straßenwesen ist dabei optimistisch und beruft sich auf die schrittweise Einführung der Hoch- und Vollautomatisierung (Stockburger, 2013).

## **2.3 Fazit**

Im Kapitel 2 wurde die zunehmende Automatisierung im Fahrkontext unter technischen Blickwinkel erörtert. Auf Basis dieser Ausführungen können weiße Flecken zukünftiger Automatisierungsbestrebungen herausgearbeitet und ein **Rahmenkonzept für die vorliegende Arbeit** abgeleitet werden. Hierfür finden sich im Folgenden aufeinander aufbauende Prämissen, welche die technische Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen zusammenfassen. Sie führen gleichzeitig zum Schwerpunkt der Arbeit, in dessen Fokus die Analyse von Übernahme- und Übergabeszenarien in einem mehrstufigen Automationsansatz steht.

**Prämisse 1:** Es findet eine Erhöhung des Automatisierungsgrades von Einzelfunktionen in spezifischen Fahrsituationen bis hin zu komplexen Fahrmanövern zur Unterstützung des Fahrers bei der Informationsverarbeitung und Handlungsumsetzung statt.

**Prämisse 2:** Es resultiert ein Übergang zu integrierten Systemauslegungen in Längs- und Querrichtung des Fahrzeuges.

**Prämisse 3:** Dies mündet über die Synthese von Assistenz und Automation in einer Bandbreite unterschiedlichster Fahrfunktionen, die gleichzeitig im Fahrzeug verfügbar sind.

**Prämisse 4:** Der Fahrer wird in ein Kontinuum von der manuellen bis hin zur vollautomatisierten Fahrzeugführung für ausgewählte Anwendungskontexte wie einer Fahrt auf der Autobahn eingebettet.

**Prämisse 5:** Im Ergebnis entstehen vielfältige Übergabe- und Übernahme-situationen zwischen Fahrer und Automation an Systemgrenzen, bei Fehlerfällen und bei der Aktivierung von Systemen.

Unter Berücksichtigung dieser Prämissen spielt die Aufgabenverteilung bzw. deren Verschiebung zwischen Fahrer und Fahrzeug zukünftig eine wichtige Schlüsselrolle. Sie wird begleitet durch Fragen der Beherrschbarkeit des Fahrzeugs im Normalbetrieb, an Systemgrenzen oder bei Systemfehlern. Zudem tritt die widerspruchsfreie Differenzierbarkeit von Systemzuständen, besonders in Übergangsszenarien (Transitionen) in den Vordergrund. Daher setzt die Arbeit bei diesen Stellgrößen an und richtet das Augenmerk auf eine nutzerzentrierte Gestaltung von Übergabe- und Übernahme-situationen im Fahrzeug.

Gemäß der Autorin dieser Arbeit sind dabei grundlegend **zwei Kernaspekte** wesentlich:

- (1) Zum einen muss parallel zu der stets schrittweisen, aufeinander aufsetzenden Einführung von Fahrerassistenzsystemen eine mehrstufige Betrachtung der Auswirkungen auf das Mensch-Maschine-System erfolgen. Daher liegt der Fokus auf der Analyse von Kontrollverschiebungen zwischen Fahrer und Fahrzeug innerhalb eines **mehrstufigen Automationsansatzes**. Dieser setzt auf potentiell denkbare Systemweiterentwicklungen in Richtung Serieneinsatz auf (vgl. Kapitel 2.1) und adressiert den prototypischen Anwendungskontext einer einfachen, monotonen Fahrsituation (vgl. Kapitel 2.2).
- (2) Zum anderen gilt es neben den Rückgaben der Fahrzeugkontrolle an den Fahrer ebenfalls die Abgabe der Verantwortung in Richtung Automation zu betrachten. Dies impliziert für die vorliegende Arbeit, dass sowohl Übergabe- und Übernahme-szenarien zwischen den Extrema der Automationsbandbreite als auch zwischen einzelnen Automationsgraden Bestandteil sind. Kernelement ist demnach der „**Grad**

**der Kontrollverschiebung**“, der in Abhängigkeit des Start- und Endmodus den Fahrer mental in der kognitiven Differenzierung des Automationsgrades sowie motorisch in der Qualität der Übernahme fordert.

Im Kapitel 4 werden aus diesen aggregierten Schwerpunkten aus technischer Sicht, die Fragestellungen der Arbeit abgeleitet (vgl. Kapitel 4.1, 4.3), Rahmenkriterien für den Untersuchungsansatz festgelegt (vgl. Kapitel 4.2) und auf die empirische Prüfung hingearbeitet (vgl. Kapitel 4.3, 4.4).

Im Kapitel 3 erfolgt jedoch zunächst eine Analyse der Automatisierungsbestrebungen aus psychologischer Perspektive, welche die technischen Betrachtungsweisen ergänzt.

### **3 Automatisierung im Fahrkontext aus psychologischer Sicht**

Aus dem Kapitel 2 wird deutlich, dass die treibenden Kräfte für die Weiterentwicklung heutiger Fahrerassistenzsysteme primär das Streben nach Erhöhung der aktiven Verkehrssicherheit, das Ziel der Komfortsteigerung während der Fahrt und die Erreichung eines effizienten Verkehrsflusses betreffen. Mit der Einführung neuer Technologien gehen allerdings gleichfalls Veränderungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle einher. Diesen widmet sich der erste Teil des vorliegenden Kapitels. Mit Bezug auf die zunehmende Automatisierung wird die Aufgabenverteilung zwischen Fahrer und System analysiert sowie die neue Rolle des Fahrers definiert (Kapitel 3.1).

Der zweite Teil des Kapitels 3 schließt an die vorangegangenen Erläuterungen an und fokussiert die Auswirkungen der veränderten Rolle des Fahrers. Im Vordergrund stehen dabei sogenannte „Automation Surprises“, die in enger Verbindung zu einem geringen Situationsbewusstsein, mangelndem Systemverständnis, Intransparenz der Automationseingriffe und Verwechslungen von Systemzuständen stehen (Kapitel 3.2). Sie sind besonders bei der Interaktion des Menschen mit automatisierten Teilfunktionen zu beachten.

Dieses Kapitel schließt mit einem zusammenfassenden Fazit, welches auf Basis der psychologischen Gesichtspunkte zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle die Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit darstellt.

#### **3.1 Veränderung der Rolle des Fahrers im Mensch-Maschine-System**

Der Begriff des Mensch-Maschine-Systems (MMS) referenziert auf das zielgerichtete Zusammenwirken von einer oder mehreren Personen mit einem technischen System zur Erfüllung eines fremd- oder selbstgestellten Auftrages (Timpe & Kolrep, 2002). Werden nun Anteile dieser Zusammenarbeit in Form von Aufgaben oder daraus resultierenden Tätigkeiten des Menschen an das System abgegeben, verändern sich zwangsläufig der Prozess sowie das Resultat jener Interaktion (Hauß & Timpe, 2002). Automatisierung geht demnach immer 1:1 mit einer Aussage zur Allokation, d.h. Verteilung von Funktionen einher und wird in der Folge auch die Rolle des Fahrers im System „Fahrer-Fahrzeug-Umwelt“ modifizieren:

„Automation is any sensing, detection, information-processing, decision-making, or control action that could be performed by humans but is actually performed by machine.“  
(Moray, Inagaki & Itoh, 2000; S. 44).

Laut Erkenntnissen aus der Arbeitspsychologie (Hacker, 1973), der Mensch-Computer-Forschung (Norman, 1984; Rasmussen, 1986) und der Luftfahrt (Sheridan & Parasuraman, 2006) sind hierbei zum einen die zugrundeliegenden Prinzipien der Funktionsverteilung

bedeutsam (vgl. Kapitel 3.1.1). Zum anderen ist das Ausmaß an Automatisierung in Kombination mit Art der automatisierten Aufgabe entscheidend (vgl. Kapitel 3.1.2). Sie definieren die Rolle des Menschen in Interaktion mit Automation (vgl. Kapitel 3.1.3). Da die Übertragbarkeit der bisher gewonnenen Erkenntnisse auf das Fahrer-Fahrzeug-System allerdings nur in limitierter Form möglich ist, forcieren die derzeitigen Entwicklungen im Fahrzeugkontext erneut die Beantwortung der Frage „Wer sollte was, zu welcher Zeit machen?“.

### **3.1.1 Prinzipien der Funktionsverteilung**

Der Begriff der Funktionsverteilung bezieht sich vorrangig auf die Verlagerung bestimmter Aufgaben des Menschen an eine Maschine (Manzey & Bahner, 2005). Er hat seinen Ursprung im 20. Jahrhundert in ersten Maßnahmen der Arbeitsteilung zwischen diesen beiden Agenten (Ulich, 2005). Er entwickelte sich zudem definitorisch mit der Zunahme an Unterstützungssystemen in jenem Bereich weiter und generierte eine Vielzahl an Ansätzen. Diese gehen historisch auf Prinzipien zurück (Bailey, 1989), die teilweise nicht mehr valide sind, jedoch bisher auch keine allgemeingültigen Kriterien hervorgebracht haben (Hancock & Scallen, 1996; Sheridan, 2000). Sie werden im Folgenden beschrieben.

Einer der ersten Ansätze, die sich der Thematik der Funktionsallokation widmete, stammt von Fitts (1951). In seiner „Men are better at – Machines are better at“ Liste beschreibt er zum einen spezifische Aufgaben, in denen Menschen den Maschinen überlegen sind. Zum anderen benennt er solche, in denen Maschinen besser abschneiden. Dieses Konzept lässt sich im Sinne der Aufgabenteilung in Mensch-Maschine-Systemen als **fähigkeitszentrierter Ansatz** bezeichnen. Die Aufgabenteilung erfolgt hier im Sinne eines kompensatorischen Prinzips entsprechend der relativen Leistungsvorteile von Mensch und Maschine. Geschwindigkeit und Genauigkeiten stehen bei dieser Einordnung im Vordergrund. Ein wichtiger Kritikpunkt betrifft die starre Funktionsteilung, welche die Motive, Ziele, Emotionen und das Befinden des Bedieners kaum beachtet (Bailey, 1989; Hoyos, 1990).

Im Gegensatz dazu haben **kostenzentrierte Ansätze** eine rein betriebswirtschaftliche Perspektive. Aufgaben werden dann automatisiert bzw. beim Menschen belassen, wenn die gewählte Lösung kostengünstiger ist (Wandke, 2004). Psychologischen Faktoren stehen hier ebenfalls nicht im Vordergrund.

In eine vergleichbare Richtung gehen **technikzentrierte Ansätze**. Sie weisen eine ingenieurwissenschaftliche Sicht auf und wollen die Gesamtleistung des Mensch-Maschine-Systems in Hinblick auf Effektivität, Sicherheit sowie Effizienz optimieren. Alle Aufgaben, die sich prinzipiell automatisieren lassen, werden hiernach auch automatisiert. Demnach

funktioniert dieser Ansatz nach dem „left-over principle“ (Bye, Hollnagel & Steinar Brendeford, 1999), welches mit einer Reduktion auf nicht automatisierbare Resttätigkeiten einhergeht. Die psychologische Qualität der beim Menschen verbleibenden Funktionen wird somit nicht berücksichtigt, obwohl bereits Hacker (1998) darauf hinweist, dass diese die psychischen Anforderungen an den Menschen wesentlich mehr bestimmen als die Beschaffenheit so genannter Schnittstellen (Mensch-Maschine-Interface). Technikzentrierte Strategien haben sich in der Folge auch negativ auf die Effektivität von MMS ausgewirkt (Sarter et al., 1997; Parasuraman & Riley, 1997).

Die Vernachlässigung des Faktors Mensch motivierte letztlich zu einer **menschzentrierten Herangehensweise**. Dieser Ansatz, welcher primär durch Billings (1997) geprägt wurde, fokussiert die Schaffung eines Gleichgewichts zwischen technik- und nutzerzentrierter Gestaltung. Mensch und Maschine werden als komplementär und nicht als konkurrierend oder gegenseitig austauschbar angesehen (Grote et al., 1995). Sie bilden ein kooperatives System, dessen Gesamtleistung optimiert werden muss (vgl. Konzept der „Teampartner“ nach Christoffersen & Woods, 2002). Hierfür müssen laut Billings (1997) folgende, wesentliche Grundsätze einer menschzentrierten Automatisierung erfüllt sein:

- Der Nutzer muss aktiv involviert sein.
- Der Nutzer muss adäquat informiert sein.
- Der Mensch muss in der Lage sein die Automation zu überwachen.
- Die Automation muss vorhersehbar sein.
- Die Automation muss den Nutzer überwachen.
- Die Intentionen des Nutzers und der Automation müssen gegenseitig kommuniziert werden.

Ziel sollte demnach die Kompatibilität bzw. Verträglichkeit zwischen Mensch und Automation sein (Bubb, 1993b). Diese bezieht sich zum einen auf die Gestaltung der Schnittstellen zwischen Mensch und System (Flemisch et al., 2008). Zum anderen bedarf es der Vereinbarkeit der inneren Modelle des Nutzers mit den wahrgenommenen Informationen der Maschine (Bubb, 1993). Coll und Coll (1989) sprechen in diesem Zusammenhang von einem „cognitive match“ (vgl. Kapitel 3.2.3). Obwohl sich eine derartige Betrachtungsweise weitestgehend durchgesetzt hat, ist nach wie vor nicht eindeutig definiert, was „menschzentriert“ genau bedeutet (Sheridan & Parasuraman, 2006). Die verschiedenen Gestaltungsprinzipien unterscheiden sich zudem teilweise voneinander bzw. lassen Fragen zu deren generellen Anwendbarkeit offen. Dennoch haben die Konzepte der nutzerzentrierten Verteilung von Aufgaben auf Mensch und Maschine in der Luftfahrt Eingang gefunden. Der Ansatz „Level of Automation“ mit variierendem Grad der Automatisierung (Draper 1995; Endsley & Kaber,

1999), die „Dynamische Funktionsallokation“ mit einem adaptiven bzw. adaptierbaren Wechsel der Aufgaben über die Zeit (vgl. Rouse, 1976; Parasuraman et al., 1992; Scerbo, 2001; Inagaki, 2003; Kaber & Endsley, 2004) und Kombinationen beider Methoden (Kaber & Endsley, 2003) können in dem Zusammenhang genannt werden. Teilweise finden sich unter dem Begriff „kooperative Automation“ auch erste Übertragungen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion (vgl. Flemisch et al., 2003; Biester, 2004, 2005; Holzmann, 2007; Hakuli et al., 2009; Geyer, 2013). Für die Definition der „neuen“ Rolle des Menschen bedarf es jedoch in allen Fällen einer Aussage zum „Level of automation“ (LOA) sowie zur Art der automatisierten Aufgabe (vgl. auch Abbildung 8). Die Basis hierfür sind Taxonomien der Automatisierung, auf welche im Folgenden eingegangen wird. Sie bestimmen über den Grad der Einbezogenheit des Menschen in den Regelkreis „Mensch-Maschine-Umwelt“ dessen Möglichkeit, sich Wissen über das System sowie über einzelne Systemzustände anzueignen. Dieses ist wiederum wesentlich für eine erfolgreiche Rückübernahme der Kontrollfunktion (Hakuli et al., 2009).

### 3.1.2 Taxonomien der Automatisierung

Am häufigsten wird der Ansatz der „flexiblen Aufgabenteilung“ von **Sheridan (1988)** zitiert, der aus zehn Automationsstufen besteht. Er reicht von einer rein manuellen Steuerung ohne jegliche Assistenz bis hin zur vollautomatisierten Ausführung von Aufgaben (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Taxonomie von Automatisierungsstufen nach Sheridan und Verplank (1978, zitiert nach Hauß & Timpe, 2002)

LOA	Systemmerkmale
1	Der Computer bietet keine Unterstützung an, der Mensch muss alles machen.
2	Der Computer bietet eine vollständige Menge an Handlungsalternativen an.
3	Der Computer bietet eine ausgewählte Menge an Handlungsalternativen an.
4	Der Computer schlägt eine Handlungsalternative vor.
5	Der Computer schlägt eine Handlungsalternative vor und führt den Vorschlag aus, wenn der Mensch es bestätigt.
6	Der Computer schlägt eine Handlungsalternative vor und führt den Vorschlag aus, sofern nicht ein Veto des Menschen die automatische Ausführung verhindert.
7	Der Computer führt den Vorschlag automatisch aus und informiert den Menschen.
8	Der Computer führt den Vorschlag automatisch aus und informiert den Menschen nur auf Anfrage.
9	Der Computer führt den Vorschlag automatisch aus und entscheidet selbstständig, ob eine Information an den Menschen erfolgt.
10	Der Computer entscheidet alles, handelt autonom und ignoriert den Menschen.

Die Sheridan'sche Taxonomie (Tabelle 1) berücksichtigt neben Entscheidungsprozessen vor allem die Instanz für die Handlungsauswahl (Operator vs. System) und die Art der Informationsweitergabe über ausgeführte Aktionen (immer - auf Anfrage des Operators – auf Ent-

scheidung des Computers - nie). Sie lässt sich zudem teilweise auf den Fahrkontext übertragen (Vollrath & Flemisch, 2006), wo anstelle des Computers das technische System im Fahrzeug tritt. Die Klassifizierung findet jedoch dort ihre Grenzen, wo es nicht allein um Entscheidungsprozesse und Aktionsausführungen geht, sondern davor liegende Handlungsphasen relevant sind (Wandke, 2005). So stimmen die Teilaufgaben beim Fahren nicht 1:1 mit den von den Autoren definierten überein bzw. treten nur punktuell auf (Vollrath & Flemisch, 2006).

Eine eher in diese Richtung gehende Taxonomie haben **Endsley und Kaber (1999)** entwickelt. Sie erweiterten das Modell von Sheridan (1988) um vier Teilaufgaben, von denen zwei vor dem Übergang von der Entscheidung zur Handlungsausführung liegen. Die vier Aufgaben umfassen die Phasen: (1) Prozessüberwachung, (2) Erzeugung von Handlungsoptionen, (3) Auswahl einer Option, (4) Ausführung der gewählten Option. Die somit entstandene Taxonomie ist in Tabelle 2 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die Autoren nur die zehn prototypischen Kombinationen aus Teilaufgaben und Automatisierungsstufe gewählt haben. Interessant ist, dass die Ausführung im Gegensatz zu Sheridan (1988) nicht immer an den Computer gebunden ist. So finden sich beispielsweise auch Realisierungen durch den Menschen oder kooperative Interaktionen zwischen Mensch und Computer.

Tabelle 2: Automatisierungsstufen nach Endsley und Kaber (1999)

		Aufgaben, die entweder vom Menschen (M) oder vom Computer (C) oder gemeinsam von (M+C) erfüllt werden			
Automatisierungsstufe		Überwachen	Erzeugen	Auswählen	Ausführen
1	Manuelle Steuerung	M	M	M	M
2	Ausführungsunterstützung	M+C	M	M	M+C
3	Stapelverarbeitung	M+C	M	M	C
4	Gemeinsame Steuerung	M+C	M+C	M	M+C
5	Entscheidungshilfe	M+C	M+C	M	C
6	Gemischte Entscheidung	M+C	M+C	M+C	C
7	Starre Systeme	M+C	C	M	C
8	Automatisierte Entscheidung	M+C	M+C	C	C
9	Überwachende Steuerung	M+C	C	C	C
10	Vollautomatisierung	C	C	C	C

Die Taxonomie lässt zwar offen, wie Mensch und Maschine bei „M+C“ genau zusammenarbeiten, bietet jedoch den Vorteil, dass die integrierten Teilaufgaben mit Handlungsphasen gleichzusetzen sind.

Eine ähnliche Erweiterung haben **Parasuraman, Sheridan und Wickens (2000)** gewählt. Sie teilten die Phasen anhand eines vereinfachten Modells der menschlichen Informations-



verarbeitung wie folgt auf: (1) Informationsaufnahme, (2) Informationsanalyse, (3) Entscheidung und Aktionsauswahl, (4) Aktionsausführung. Jene Phasen weisen deutliche Überlappungen mit denen von Endsley und Kaber (1999) auf (Wandke et al., 2005). Beispielsweise umfasst die Stufe „Entscheidung und Aktionsauswahl“ bei Endsley & Kaber (1999) die Teilaufgaben „Erzeugen“ und „Auswählen“ (vgl. Tabelle 2). In Kombination mit den Automationsleveln von Sheridan und Verplank (1978, vgl. Tabelle 1) entsteht dann eine Taxonomie, welche eine Einordnung von Systemen nach Automatisierungsgrad und einzelner Informationsverarbeitungsphase zulässt (vgl. Abbildung 14).

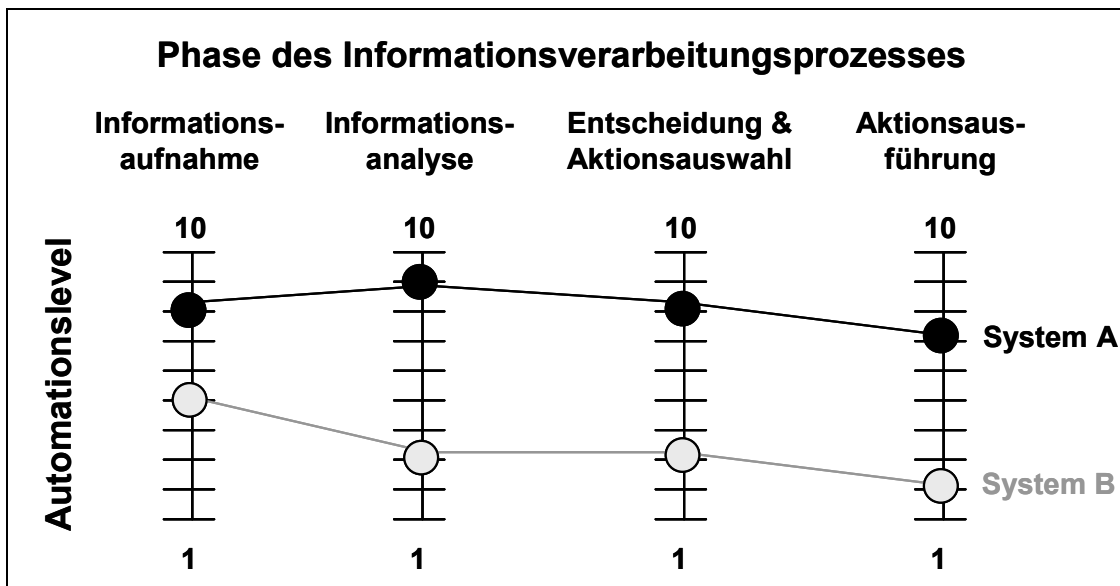


Abbildung 14: Automatisierungsgrade zweier exemplarischer Systeme (A, B) in verschiedenen Phasen des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses (Parasuraman et al., 2000; modifiziert)

Die erläuterten Taxonomien stellen somit begleitend zur technischen Definition gemäß Abbildung 8 einen Ansatz zur Beschreibung und Klassifizierung der Wirkungsweise von technischen Systemen dar (vgl. Kapitel 2.1.2). Über die Verknüpfung von Handlungsphasen und Automationsstufen erhält man eine Struktur, mit deren Hilfe Assistenzfunktionen gestaltet und letztlich deren Auswirkungen auf das Mensch-Maschine-System evaluiert werden können (vgl. Haller, 2001; Buld, Tietze & Krüger, 2005; Vollrath & Flemisch, 2006). Die Rolle des Menschen mit den entsprechenden Effekten auf dessen Leistungsfähigkeit sowie Aktivierungszustand (vgl. Kapitel 3.2) wird dabei wesentlich von der Höhe der Automatisierungsstufe in einzelnen Handlungsphasen bestimmt (vgl. Endsley & Kiris, 1995; Endsley & Kaber, 1999; Moray et al., 2000; Lorenz et al., 2001; Clamann, Wright & Kaber, 2002). Die diesbezüglich aus dem Bereich der Luftfahrt gewonnenen Erkenntnisse können allerdings nicht uneingeschränkt auf den Automobilkontext übertragen werden. So ist der Arbeitsplatz des Piloten im Allgemeinen nicht 1:1 mit dem des Fahrers vergleichbar. Den

Straßenverkehr zeichnen dazu dynamischere und zeitkritischere Situationen aus (Flemisch, Vollrath & Rataj, 2007). Der Fahrer ist darüber hinaus zumeist kein Profi, der kontinuierlich an den entsprechenden Systemen trainiert und ausgebildet wird. Zudem ist die Fahraufgabe nicht mit einer anderen Person teilbar und fokussiert weniger komplexe Planungs- sowie Entscheidungsprozesse (Vollrath & Flemisch, 2006). Folglich adressieren die wachsenden Automatisierungstendenzen im Fahrkontext erneut die Problematik der Wahl der „richtigen“ Automationslevel (Sheridan, 2000). Gegenwärtig führt die Implementierung von ADAS im Fahrzeug jedoch eher zu einer Verschiebung der traditionellen Aufgaben des Fahrers hin zu einer Rolle, die der eines „Supervisors“ ähnelt (Sheridan, 1997). Dies betrifft vor allem Systeme der teilautomatisierten Fahrzeugführung (vgl. Kapitel 2.1.3). Einen Überblick über die Risiken einer derartigen Funktionsallokation gibt Abschnitt 3.1.3. Jene werden mit Bezug zum Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit im Kapitel 3.2 nochmals differenzierter analysiert.

### 3.1.3 Rolle des Fahrers bei zunehmender Automatisierung

Im Fahrzeugsektor findet sich derzeit ein Trend, welcher sich in den vergangenen Jahrzehnten vor allem bei der Pilotentätigkeit in Verkehrsflugzeugen nachteilig ausgewirkt hat (vgl. Endsley & Kiris, 1995; Sarter & Woods, 1995; Sheridan & Parasuraman, 2006). Hintergrund war zumeist die Veränderung der Rolle des Menschen vom aktiven Regler zum passiven Überwacher (Sheridan, & Verplank, 1978; Sheridan, 1988). Eine vergleichbare Funktionsverschiebung liegt aktuell im Zusammenhang mit assistierenden bzw. teilautomatisierten Systemen im Fahrzeug vor. Auch dabei erfüllt der Fahrer bereits in Anteilen nur noch eine korrigierende bzw. überwachende Funktion. So hat er beim ACC die Aufgabe die Längsführung in spezifischen Geschwindigkeitsbereichen zu überwachen und bei Bedarf zu überstimmen. Anstelle einer völlig autarken Durchführung von Regelaufgaben, erfolgt durch die technische Weiterentwicklung der FAS demnach eine schrittweise Entbindung des Menschen aus dem Kontroll-Loop (vgl. Abbildung 15 nach Hauß & Timpe, 2002). Er ist somit immer stärker „out of the loop“ bei gleichzeitig wachsender Anzahl und Komplexität der Fahrfunktionen (vgl. Rasmussen & Rouse, 1981; Bainbridge, 1983; Norman & Orlady, 1989; Endsley & Kiris, 1995; Parasuraman et al., 2000; Wickens & Holland, 2000).

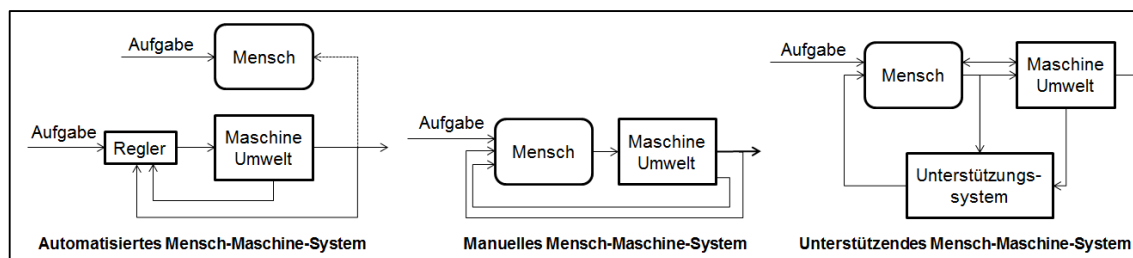


Abbildung 15: Das Unterstützungssystem zwischen manuellem und automatisiertem Mensch-Maschine-System (Hauß & Timpe, 2002; modifiziert)

Eine abnehmende Involviertheit im Regelkreis „Fahrer-Fahrzeug-Umwelt“ bedingt jedoch, dass der Fahrzeugführer weniger Feedback über die ablaufenden Prozesse erhält (Norman, 1990; Endsley & Kiris 1995). Er hat somit kaum Möglichkeiten sich systematisch Wissen über das System im Sinne eines „Images“ anzueignen (Norman, 1986, 1988) und die Erfahrungen über Systemantworten in verschiedenen Fahrsituationen mental abzubilden (vgl. Kapitel 3.2.3). Das Systemverhalten wird somit intransparenter und kann weniger gut vorhergesagt werden (Sarter et al., 1997). Für den Nutzer bleiben deshalb die Fragen „Was macht die Automation gerade?“, „Warum macht sie das?“ und „Was tut sie als nächstes?“ zumeist unbeantwortet (Wiener, 1982). In der Folge führt diese diskontinuierliche und selektive Informationsaufnahme zu einer Minderung an Situationsbewusstsein beim Fahrer (vgl. Kapitel 3.2.1) und bedingt bei komplexen Systemen ein mangelndes Verständnis für einzelne Zustände der Automation (vgl. Kapitel 3.2.2). Jene moderierende Faktoren setzen jedoch zumeist eine effiziente Überwachung und eventuelle Rückübernahme der Fahrzeugkontrolle voraus (Wiener & Curry, 1980; Wickens, 1992; Endsley, 1999). Das Zeitfenster bis zur Reaktion auf Abweichungen, Fehlfunktionen oder Systemfehler könnte sich demnach überproportional vergrößern (Endsley & Kiris, 1995; Parasuraman et al., 1996). Ferner besteht die Wahrscheinlichkeit einer falschen Nutzung vorhandener Informationen, die zu so genannten „Mode Errors“ führen können (vgl. Monk, 1986; Degani, Shafro & Kirlik, 1996; Leveson & Palmer, 1997). Mit Bezug zu den „Ironien der Automatisierung“ (Bainbridge, 1983) ist bei einer derartig gestalteten Funktionsallokation also die Gefahr gegeben, dass es zur Verlagerung der Problematik „Mensch als Unfallverursacher“ kommt. Vor allem in Situationen hoher Beanspruchung (z.B. unvorhergesehene, zeitkritische Ereignisse), in welchen der Fahrer wieder die Kontrolle übernimmt, stellt sich die Frage, ob er noch als vollwertige Rückfallebene dienen kann (vgl. „Clumsy Automation“ laut Wiener, 1989). So kann die anforderungsarme Überwachungstätigkeit zur Unterforderung des Menschen führen (Sanders, Parasuraman & Mouloua, 1983) und in der Folge Vigilanzminderungen (vgl. Hogema, Van der Horst & Jansen, 1994; Sarter et al., 1997), Aufmerksamkeitsverschiebungen (Stanton & Young, 1998) oder Leistungseinbußen (Endsley & Kiris, 1995; Parasuraman et al., 2000) bedingen (vgl. Kapitel 3.2.4, 3.2.5).

### **3.2 Auswirkungen der veränderten Rolle des Fahrers im Mensch-Maschine-System**

Wie im Kapitel 3.1.3 bereits dargestellt, besteht der prekäre Aspekt einer zunehmenden Automatisierung der Fahraufgabe in der Veränderung der Rolle des Fahrers vom aktiven Regler hin zum passiven Supervisor. Die verbleibenden Aufgaben der Planung, Überwachung sowie Fehlerdiagnose (Warm, Dember & Hancock, 1996) führen somit zu einer selektiven Informationsaufnahme und Aufmerksamkeitsausrichtung (Endsley, 1996; Parasuraman, Sheridan & Wickens, 2000). Kontrovers zum Begriff „Automation“ dient der

Mensch dennoch in vielen technischen Systemen als Rückfallebene. Folglich werden die Aufgabenanforderungen nicht durch Automatisierung reduziert, sondern es entstehen neue kognitive Aufgaben, die trotz Entbindung aus dem Kontroll-Loop vom Menschen erfüllt werden müssen (Sarter et al., 1997). In Analogie zur Aussage „Humans do not make good monitors“ (Wickens, 1992) konnten in der Folge vor allem im Bereich der Luftfahrt neue Arten von Fehlern dokumentiert werden, die in zahlreiche Katastrophen mündeten (Wiener & Curry, 1980, Wiener, 1985; Monk, 1986; Billings, 1991). Die Ursachen dieser werden zumeist unter dem Phänomen der „Out-of-the-loop-performance-problems“ subsumiert (Endsley & Kiris, 1995; Parasuraman et al., 2000). Jene äußern sich im Wesentlichen in einer ausbleibenden bzw. verzögerten Entdeckung von Fehlern des Systems sowie in einer Vergrößerung des Zeitfensters für die Kontrollübernahme durch den Menschen (Endsley, 1996). Ein Schlüsselfaktor für derartige Reaktionshemmnisse ist die Ausprägung des Bewusstseins darüber, welche Situation gerade vorliegt (Situation Awareness) und welcher Modus der Automation (Mode Awareness) gerade aktiv ist (vgl. Kapitel 3.2.1, 3.2.2). Die Transparenz der Automation moduliert demnach entscheidend, ob der Nutzer ein zutreffendes mentales Modell über das System herausbilden kann und welches Verhalten er in definierten Situationen erwartet (vgl. Kapitel 3.2.3). Effiziente Entscheidungs- und Kontrollprozesse gelingen folglich nur dann, wenn der Mensch weiß, in welchem Zustand sich das System gerade befindet, welche Handlungsalternativen er hat und welchen Effekt die Ausführung dieser haben wird (vgl. Wiener, 1989; Sarter & Woods, 1992; Wickens, 1992). Da die genannten Faktoren insbesondere in komplexen und dynamischen Umwelten zum Tragen kommen (Kaber & Endsley, 1997), sind sie auch im Fahrkontext bei der Interaktion des Fahrers mit unterschiedlich stark automatisierten Fahrfunktionen zu beachten. Mit Bezug auf die Entwicklungstendenzen im Automobilbereich, sollte hierbei die Einbettung des Fahrers in eine Bandbreite von Assistenz und Automation im Vordergrund stehen, die vielfältige Übergabe- sowie Übernahmeprozesse bedingt (vgl. Kapitel 2.1.6). Folglich eignen sich als Prüf-szenarien vor allem Transitionssituationen, in denen die Kontrolle zwischen Fahrer und verschiedenen Automationsstufen verschoben wird. Diesbezüglich liegen derzeit jedoch kaum Erkenntnisse für den Fahrzeugsektor vor (Kapitel 3.2.5). Grundlegende Auswirkungen von Automation auf den Fahrer sind hingegen vielfältig dokumentiert und können mit als Erklärungs-basis genutzt werden (Kapitel 3.2.4).

### **3.2.1 Situation Awareness**

Der Begriff „Situation Awareness“ (SA) referenziert im Allgemeinen auf die Fähigkeit einer Person, hoch dynamische bzw. komplexe Situationen umfassend wahrzunehmen und sie adäquat zu interpretieren (Endsley, 1995b). Diese Vorbedingung ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass eine antizipative, zielgerichtete Steuerung der Handlungsplanung

sowie deren Absicherung erfolgen kann (Smith & Hancock, 1995; Rauch, 2009). Dementsprechend werden Fehler des Menschen oder daraus resultierende Unfälle häufig mit mangelndem Situationsbewusstsein in Verbindung gebracht (Endsley, 1994). Die Vielfältigkeit der Definitionen von Situation Awareness (vgl. Endsley, 1988, Adams, Tenney & Pew, 1995; Sarter & Woods, 1995; Smith & Hancock, 1995; Wickens, 1996; Durso & Gronlund, 1999; Baumann, Petzoldt & Krems, 2006) als Konstrukt, Prozess oder Produkt zeigt jedoch, dass trotz reger Forschungsaktivität der Begriff nicht eindeutig bestimmt werden kann. So wird in **zustandsorientierten Ansätzen** das Produkt des Situationsbewusstseins im Sinne des Wissens über die momentane Situation berücksichtigt. Laut eines der einflussreichsten **Modelle nach Endsley** (1995b) definieren dabei drei Teilebenen das Situationsbewusstsein (vgl. Abbildung 16). Jene weisen Analogien zu verschiedenen Stufen der Informationsverarbeitung auf und fokussieren „the perception of the elements in the environment within a span of time and space (Ebene 1), the comprehension of their meaning (Ebene 2) and the projection of their status in the near future (Ebene 3)“ (Endsley, 1995b, S. 36). In der Begriffsbestimmung wird deutlich, dass Endsley (1995b) vor allem die Bedeutung der zeitlichen Dynamik betont. Diesbezüglich sind die Zeitabschätzung für eine ereignisgebundene Handlung und die dynamische Anpassung der aktuellen Situationsbewertung zentrale Punkte in der Situation Awareness Definition (vgl. Endsley, 2000; Pew, 2000; Sarter & Woods, 1991).

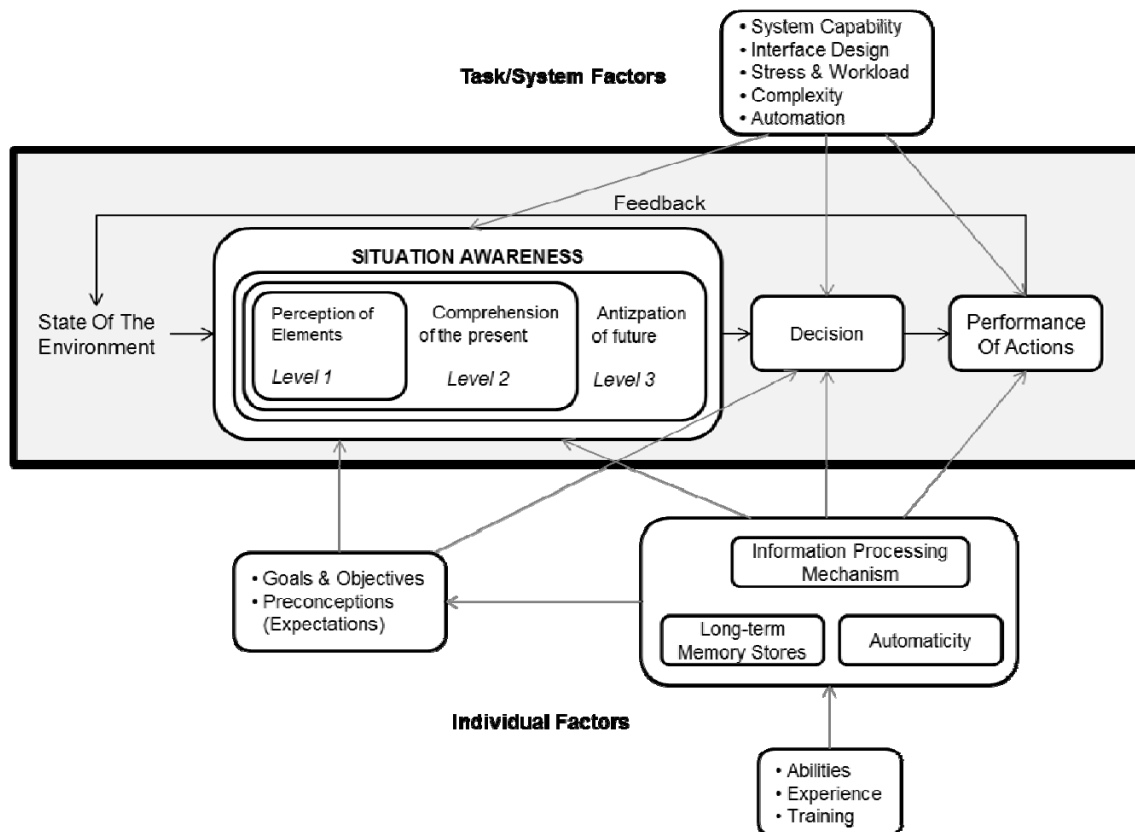


Abbildung 16: Modell von Situationsbewusstsein nach Endsley (1995b; modifiziert)

Auf dem **Level 1** in Abbildung 16 erfolgt die Wahrnehmung des Zustands, der Merkmale und der Dynamik kritischer Situationselemente (Endsley, 1996). Die hierbei wirkenden Prozesse können zum einen willentlich (top-down) oder zum anderen unwillentlich (bottom-up) durch auffällige bzw. neuartige Reize gesteuert werden (Durso & Gronlund, 1999). Auf dem **Level 2**, der Verstehensebene, werden die gewonnenen Informationen zu einem ganzheitlichen Bild der augenblicklichen Situation aggregiert und mit Bedeutung versehen. Die Wahrnehmung und Integration der Situationselemente erfolgt stets in Relation zu personenabhängigen Faktoren wie z.B. Ziele und Erwartungen des Operators (vgl. Abbildung 16). Jene lenken über konzeptgesteuerte (top-down) Datenprozesse die Aufmerksamkeit auf ganz bestimmte Reize der Umwelt (vgl. Rumar, 1985; Adams et al., 1995; Durso & Gronlund, 1999; Wickens, 2005; Schlag, 2008b). So sind einerseits eine Vielzahl von Extra-Motiven zu beachten (Schlag & Schade, 2007). Andererseits sehen Menschen häufig nur das, was sie zu sehen erwarten (Endsley, 2000). Folglich muss neben den objektiven, äußeren Bedingungen auch deren subjektive Repräsentation in das Modell eingehen. Der Vorteil einer derartigen top-down Datenverarbeitung ist, dass unter Zuhilfenahme bestehender Schemata im Langzeitgedächtnis (vgl. Kapitel 3.2.3) Erwartungen über Reize gebildet werden können, die noch nicht existent sind. Ein Nachteil dabei ist, dass infolge der aufmerksamskeitsgebundenen Selektionsprozesse zumeist nicht alle Informationen beachtet werden (vgl. „Looked-but-failed-to-see“ Phänomen nach Simons, 2000) oder nicht immer die objektiv wichtigste Information ausgewählt wird (Renge, 1997). So zeichnet sich mangelndes Situationsbewusstsein in den meisten Fällen (35 %) durch Fehler in Situationen aus, in denen zwar alle Informationen verfügbar waren, der Mensch diese jedoch ignorierte (Jones & Endsley, 1996). Daneben sind 20 % der Defizite auf Schwierigkeiten im Verständnis der Situation zurückzuführen (Jones & Endsley, 1996). Der **Level 3** der Abbildung 16 beinhaltet letztlich die Generierung von Hypothesen über die zukünftige Situationsentwicklung. Es erfolgt somit eine Antizipationen bevorstehender Handlungen oder Ereignisse. Da die gedankliche Vorwegnahme auf dem erreichten Verständnis der Situation (Ebene 2) basiert, bestimmt diese wesentlich die Effizienz der anschließenden Entscheidungs- bzw. Handlungsprozesse (Endsley, 1996). Deshalb ist es auf dem Level 2 wichtig, die richtigen mentalen Modelle der Situation aufzubauen (vgl. Kapitel 3.2.3). Dies impliziert gleichzeitig, dass vor allem top-down basierte Prozesse bei der Erfassung von Situationsbewusstsein berücksichtigt werden müssen. Jene sind zumeist durch Erwartungen über den „prototypischen“ Verlauf einer Situation gekennzeichnet und können somit auch zu systematischen Fehlern bei der Auswahl bzw. Interpretation von Informationen führen. Derartige Fehler machen laut Jones und Endsley (1996) 18 % aller auf mangelndes Situationsbewusstsein zurückführbaren Fälle aus. Davon gehen 7 % zu Lasten eines fehlenden oder unzureichenden mentalen Modells. 6,5 % sind durch die Aktivierung des falschen Situationsmodells und 4,5 % durch übermäßi-

ges Vertrauen in die vom mentalen Modell vorgegebenen Default-Werte bedingt. Welche Handlungen in der Folge ausgewählt werden bzw. wie sich deren Ausführung gestaltet, ist nach Endsley (2000) jedoch nicht mehr Bestandteil von Situationsbewusstsein. Die Autorin betrachtet Situationsbewusstsein somit eher als eine separate Stufe vor dem Entscheidungsprozess, der trotz adäquatem Situationsbewusstsein fehlschlagen kann (Endsley, 1995a). Umgekehrt kann auch mangelndes Situationsbewusstsein in richtige Entscheidungen münden. Die Ursachen hierfür liegen zum einen in personengebundenen Größen wie z.B. Fähigkeit, Erfahrung oder Training (vgl. Abbildung 16). So determiniert insbesondere die Erfahrung des Menschen, welche Verhaltensmuster wachgerufen werden (Schlag & Heger, 2002). Zudem geht mit der zunehmenden Erfahrung ein immer stärker ausgeprägtes, mentales Modell der Situation einher. Dieses mündet in einer effizienteren Suche nach relevanten Reizen, die über die reine Antizipation des am wahrscheinlichsten zu erwartenden Endzustandes hinausgeht (Crundall & Underwood, 1998). Zum anderen liegen die Gründe in aufgabenabhängigen Anforderungen, die beispielsweise mit der Komplexität der Aufgabe und der Gestaltung der Schnittstelle zusammenhängen (vgl. Abbildung 16). Hierbei spielen personelle Ressourcen und die Einschätzung der eigenen Handlungsmöglichkeiten eine entscheidende Rolle (vgl. Richter & Hacker, 1998, Pew, 2000; Fuller, 2005). So ist das Ausmaß der Beanspruchung des Menschen nicht nur von der Art sowie Intensität der Umwelthanforderungen abhängig, sondern wird auch von der Inanspruchnahme personeller Leistungsvoraussetzungen (Richter & Hacker, 1998) und durch Bewertungsprozesse beeinflusst (vgl. „primary, secondary appraisal“ nach Lazarus & Folkman, 1984).

Im Gegensatz zu zustandsbezogenen SA-Modellen wird in **prozessorientierten Ansätzen** eher die Vielzahl der am Situationsbewusstsein beteiligten kognitiven Mechanismen betont (vgl. Abbildung 17). Das heißt, es wird die Frage beantwortet, wie Situation Awareness entsteht. Jene kognitiven Prozesse umfassen die Wahrnehmung, die Aufmerksamkeit, Gedächtnisprozesse, Schemata und mentale Modelle (vgl. Fracker, 1988, Tenney et al., 1992; Taylor & Selcon, 1994; Adams et al., 1995; Smith & Hancock, 1995). Sie dienen zur Erlangung von Wissen über die aktuelle Situation und beziehen sich somit auf diejenigen Faktoren, welche zum Aufbau bzw. zur Aufrechterhaltung von Situation Awareness führen (Sarter & Woods, 1991). So wirken bei der Informationsgewinnung (Level 1, Abbildung 16) bereits Prozesse der Aufmerksamkeitsselektion (vgl. Endsley & Smith, 1996; Endsley & Rodgers, 1998; Gugerty, 1998) oder die Grenzen des Arbeitsgedächtnisses (vgl. Endsley, 1988; Fracker, 1988; Jones & Endsley, 1996; Gugerty & Tirre, 1997; Wickens & Holland, 1999). Dabei ist zu beachten, dass auch Inhalte ohne gerichtete Aufmerksamkeit bewusst sein können, jedoch eventuell nicht erinnert oder berichtet werden (vgl. „Problem of reportability“ nach Lamme, 2000). Darüber hinaus gewinnen auf der Ebene 2 (Abbildung 16) Ge-

dächtnisinhalte des Langzeitgedächtnisses an Bedeutung, die zumeist in Form von mentalen Modellen oder Schemata wirksam sind (vgl. Kapitel 3.2.3). Sie helfen dem Operateur über eine gezielte Aufmerksamkeitssteuerung sowie über effiziente Integrationsmechanismen Situationen zu klassifizieren und nachzuvollziehen (Klein, 1989; Endsley, 1988, 1995; Adams et al., 1995).

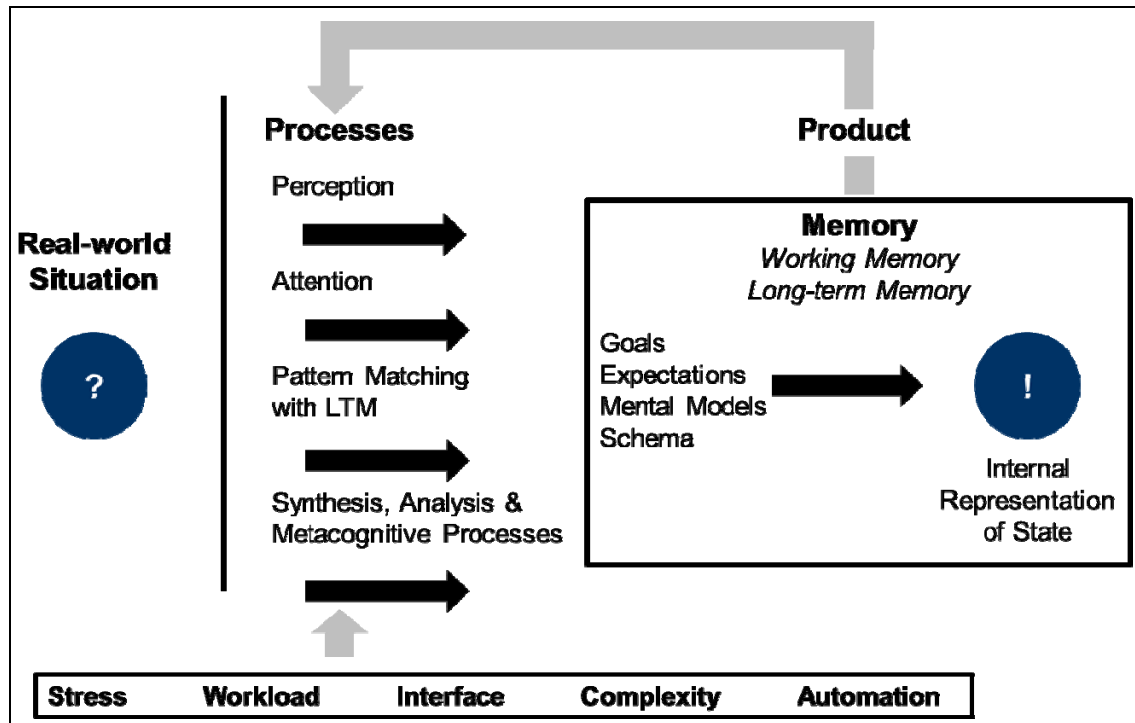


Abbildung 17: An Situationsbewusstsein beteiligte kognitive Prozesse (Endsley, 2000; modifiziert)

Demnach wird während des Verstehens immer ein Wissensnetz aus einfachen Assoziationen zwischen wahrgenommener Information und dem bereits aus Vorerfahrung bestehenden Hintergrundwissen aufgebaut (Baumann et al., 2006). Dadurch entsteht ein so genanntes **Situationsmodell**, welches kontextsensitiv Wissen aktiviert und den augenblicklichen Zustand des Verstehensprozesses beschreibt (vgl. Croft et al., 2004; Klein, Moon & Hoffmann, 2006). Das Situationsmodell beinhaltet also stets die mentale Repräsentation der aktuellen Situation und beeinflusst zudem über Projektion bzw. Antizipation die Aktivierung von Handlungsschemata (Dominguez, 1994; Kintsch, 1998). Diese Bedeutung des Rückgriffs auf vorhandenes Wissen für das Situationsverständnis spiegelt sich auch in der Definition des Situationsbewusstseins nach Wickens (1996) wider:



„Situation Awareness is the continuous extraction of information about a dynamic system or environment, the integration of this information with previously acquired knowledge to form a coherent mental picture, and the use of that picture in directing further perception of, anticipation of, and attention to future events.”  
(Wickens, 1996, S.1)

Zusammenfassend ist für die Entwicklung von Situationsbewusstsein unerlässlich, dass der Mensch ein zutreffendes mentales Modell über den aktuellen System- oder Situationszustand hat und in der Folge seine Handlungsalternativen sowie deren Ausführungseffekte kennt („Interface Knowledge“ nach Endsley, 2000). Im Kontext von komplexen sowie zumeist automatisierten Systemen wird hierfür häufig der Begriff „**Mode Awareness**“ verwendet (vgl. Kapitel 3.2.2), da das System infolge zahlreicher Zustände (Modi) durch verschiedene Verhaltensweisen gekennzeichnet ist. Alternative Termini sind „Situational Awareness“ oder „Automation Awareness“ (vgl. Harwood, Barnett & Wickens, 1988; Hartman & Secrist, 1991; Endsley, 1996). Alle beziehen sich jedoch auf das Wissen bzw. Verständnis des Operators über aktuelle sowie zukünftige Zustände und Verhaltensweisen des Systems innerhalb eines definierten Modus (Anthony & Degani, 1997). Somit ist Mode Awareness eine hinreichende Voraussetzung für das Nachvollziehen des Systemverhaltens und kann als notwendiger Bestandteil der Situation Awareness angesehen werden (Sarter et al., 1997; Gutwin, 1997; Lüdtko & Möbus, 2002; Kolbig & Müller, 2013):

„Pilots may not be able to tell what mode or state the automation is in, how it is configured, what it is doing, and how it will behave. This may lead to reduced situation awareness and errors.” (Funk et al., 1999, S. 9)

Infolge der in der Aussage implizierten Interaktion des Menschen mit unterschiedlich stark automatisierten Systemen, hat der Begriff Mode Awareness auch für die dynamische Interaktion zwischen Fahrer und Fahrerassistenzsystemen an Bedeutung erlangt (Kompaß, 2008). Insbesondere in Übergabe- und Übernahme-situationen ist das Bewusstsein über den aktuellen Systemzustand eine notwendige Voraussetzung für effiziente Handlungs- und Entscheidungsprozesse (Sarter & Woods, 1995). So untermauert Wickens (1996) im Kontext automatisierter Systeme, dass sich dahingehende Defizite erst dann zeigen, wenn schnelles Reagieren auf Unvorhergesehenes oder abnormale Situationen erfolgen soll (Sarter & Woods, 1994). Passt das Verhalten des Systems nämlich nicht zum Erwarteten, treten „Automation Surprises“ auf (Sarter et al., 1997), die als „Mode Errors“ oder „Mode Confusions“ bekannt geworden sind. Sie werden im folgenden Kapitel 3.2.2 erläutert.

### 3.2.2 Mode Awareness

Neue Technologien bieten ein immer größer werdendes Potential, technische Prozesse automatisiert ablaufen zu lassen. Die hiermit verbundene Flexibilität ermöglicht Systemdesignern eine Vielzahl von Funktionen anzubieten, die über unterschiedliche Bedienoptionen zur Erhöhung der Systemperformance beitragen. Allerdings geht hiermit gleichfalls eine Zunahme an verschiedenen **Modi** einher, welche das jeweilige Systemverhalten definieren und den Zustandsraum eines komplexen Gesamtsystems aufteilen (Ashby, 1956). In diesem Sinne können Modi auch als neue Stufen der Automatisierung verstanden werden, die zusätzliche kognitive Anforderungen an den Nutzer stellen (Woods, 1993). Dieser muss nun wissen, wie sich das System in jedem Modus verhält und welche Eingaben zur Veränderung dessen zu tätigen sind (Klatzky, 1984). Zudem ist es notwendig die Aktionen zu überwachen, um den momentanen Systemzustand zu kennen sowie zukünftige Verhaltensweisen zu antizipieren (Sarter & Woods, 1995).

Insbesondere in der modernen Luftfahrt (z.B. Flight Management Systemen) ist man sich diesbezüglich den Problemen bewusst, welche mit zunehmender Automatisierung und steigender Komplexität zusammenhängen (Sarter & Woods, 1992, 1994). So wird von Forschern aus dem Bereich „Human Factors in Aviation“ bei Flugunfällen zumeist ein „Lack of Mode Awareness“ als eine der kritischsten Folgen angesehen (Sarter & Woods, 1995, Funk et al., 1999). **Mode Awareness** (MA) bezieht sich in dem Zusammenhang auf das Wissen bzw. Verständnis des Operateurs über aktuelle sowie zukünftige Zustände und Verhaltensweisen des Systems innerhalb eines definierten Modus (Anthony & Degani, 1997). Es ist die Fähigkeit, das Systemverhalten zu verfolgen und zu antizipieren (Sarter et al., 1997). Diesbezüglich ist zu beachten, dass ein System auch verschiedene Modi besitzen kann. Obwohl von denen immer nur einer aktiv ist, können sich aber auch schnelle Wechsel zwischen diesen ereignen (Degani, Shafit & Kirlik, 1995). Erfolgen derartige Übergänge zwischen den einzelnen Systemzuständen spricht man von **Mode Transition**. Hierbei ist der entscheidende Faktor die Art der transitionsauslösenden Inputgröße (Ashby, 1956). Im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion über Systemmodi werden diesbezüglich drei Typen unterschieden:

- Manueller Input mit einer nutzerseitig ausgelösten Transition
- Automatischer Input mit einer systemseitig initiierten Transition
- Automatischer / Manueller Input mit einer nutzerseitig oder systemseitig ausgelösten Transition

Obwohl die drei Übergangsvarianten unterschiedlich häufig auftreten, determiniert die Transparenz auf allen Inputebenen welches Systemverhalten der Nutzer erwartet und wie er darauf aufbauend reagiert (Sarter et al., 1997). Hierbei ist zudem zu beachten, dass bei fortgeschritteneren Technologien die Systemantwort nicht nur durch den Input des Nutzers, sondern auch durch situationale Faktoren bestimmt wird (Leveson et al., 1997). Diesbezüglich sind vor allem implizite Veränderungen des Modus zu nennen, die für den Nutzer infolge eines verzögerten bzw. ausbleibenden Feedbacks nicht erkannt werden können. Probleme in Form von Entscheidungs- und Handlungsfehlern ergeben sich also immer dann, wenn eine Fehlidentifikation bzw. Fehlinterpretation des aktuellen Systemmodus stattgefunden hat (Dekker, 2006). Jene Minderung bzw. jener Verlust an Mode Awareness bedingt in der Folge so genannte **Mode Errors**, welche ein Systemverhalten produzieren, das nicht vom Nutzer intendiert war. Sarter und Woods (1995) unterscheiden diesbezüglich zwischen „errors of commission“ und „errors of omission“. Im ersten Fall führt der Nutzer eine unangemessene Handlung durch, im zweiten Fall lässt er eine notwendige Handlung aus. Hintergrund dieser Modusfehler ist, dass der Nutzer glaubt, sich in einem Modus zu befinden, der jedoch gerade gar nicht vorliegt (Norman, 1983a; Monk, 1986). Norman (1981) klassifiziert eine derartige Fehlhandlung auch als „Action Slip“, die nach Reason (1990) auf der wissensbasierten Ebene in einen „Mistake“ mündet. Die Konsequenzen dessen stehen in der Literatur oft in Verbindung mit dem Phänomen der „**Automation Surprises**“ (Palmer, 1995; Sarter, Woods & Billings, 1997; Dekker, 2006). Dies geht typischerweise mit Verwechslungen von Systemzuständen und folglich dem Systemverhalten einher (Bredereke & Lankenau, 2005). Sie wurden bei der Interaktion des Menschen mit automatisierten Flugkontrollsystemen zahlreich beobachtet sowie in Protokollen über Vorfälle während eines Flugs dokumentiert (vgl. Wiener, 1989; Eldredge, Dodd & Mangold, 1991; Sarter & Woods, 1994; Degani, Mitchell & Chappell, 1995; Degani, Shafit & Kirlik, 1996). Bezüglich einer zusammenfassenden Darstellung der Befunde sei an dieser Stelle auf Billings (1997) verwiesen.

### **Das Problem vernetzter und komplexer Modi**

Mode Errors infolge eines „Lack of Mode Awareness“ betreffen jedoch nicht nur die Luftfahrt oder sind auf Bereiche mit komplexen, automatisierten Systemen begrenzt. Betrachtet man alltägliche Gebrauchsgegenstände oder Konsumprodukte finden sich zahlreiche Parallelen, welche die Verfügbarkeit von **multiplen Modi** betreffen. Aus dem Gebiet der Telekommunikation können beispielsweise Fernbedienungen, Telefaxe oder Mobilfunktelefone genannt werden. Aus dem Automobilsektor sind exemplarisch Radio-Navigationssysteme oder Fahrassistenzen wie ein Tempomat oder das ACC zu erwähnen. All jene Beispiele weisen eine Vielzahl an Funktionen, respektive Zustände (Modi) auf, die mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für Mode Errors einhergehen (Anthony & Degani, 1997). Im Sinne einer Funktion

über die Zeit variiert das Verhalten der Maschine oder des Systems in Abhängigkeit von Input- bzw. Outputgrößen und Zuständen. So muss sich der Nutzer bei jeder Bedienung über den zuletzt aktivierten Modus bewusst sein, damit seine Aktionen entweder zum gewünschten Ziel führen oder plötzliche Verwunderungen infolge eines unerwarteten Systemverhaltens vermieden werden. So lassen sich auf heutigen Waschmaschinen einige Tasten nur entsprechend ihrer Funktion nutzen, wenn das zugehörige Waschprogramm gleichfalls aktiviert ist. Auch wenn hier keine bedeutsamen Konsequenzen bei einer Fehlbedienung folgen, wird aus psychologischer Perspektive das Problem deutlich: Der Nutzer wird gefordert, die richtigen Informationen über den Modus zu finden bzw. sich an den zuletzt aktiven Zustand zu erinnern. Fehlt ihm diese Wissensbasis, kann er seine Handlungsauswirkungen nicht angemessen präzisieren. Ein ähnliches Szenario aus dem Automobilkontext ist im Zusammenhang mit der Nutzung des Tempomaten möglich (vgl. hierzu auch „unintended accelerations“ nach Schmidt, 1993). Übertritt der Nutzer hier beispielsweise temporär die konstante Geschwindigkeitshaltung mit dem Gaspedal und lässt dann dieses situationsbedingt wieder los, kann sich folgende Konstellation ergeben: Der Fahrzeugführer gibt die Kontrolle infolge einer Autobahnausfahrt unbewusst wieder an den Tempomaten ab. Da der Fahrer nicht bremst, verliert das Fahrzeug kontinuierlich an Geschwindigkeit. Bei Erreichung der Setzgeschwindigkeit schaltet sich jedoch der Tempomat automatisch wieder hinzu und hält die Geschwindigkeit ab diesem Punkt konstant bei. Tritt nun eine Auffahrsituation ein (z.B. langsames Vorderfahrzeug, Ampelkreuzung), kann die erfolgte, latente Transition zwischen zwei Systemzuständen zu kritischen Fahrsituationen führen (Anthony & Degani, 1997).

Neben diesen Produktbeispielen mit multiplen Modi kommt hinzu, dass einige andere eine **Moduserweiterung** aufweisen. So kann man mit einem Faxgerät nicht mehr nur faxen, sondern auch kopieren, scannen und drucken. Als Resultat einer derartigen Funktionsausdehnung liegen heutzutage die Systemzustände in gruppierter Form vor und gehen mit einer reduzierten Anzahl von Kontroll- bzw. Bedienelementen einher. Anstelle eines einheitlichen Sets für die Anzeige sowie Bedienung jedes einzelnen Modus finden sich „Switching Devices“, Doppelbelegungen von Tasten oder simultane Darstellungen von verschiedenen Funktionen auf ein und demselben Display. Im Automobilbereich bestätigt sich diese Tendenz z.B. in den Bemühungen einer logischen Gruppierung von Fahrerassistenzsystemen, um deren Quantität über einen höheren Abstraktionsgrad in der mentalen Wahrnehmung des Fahrers zu reduzieren (vgl. Helmer et al., 2008; Lindberg et al., 2009; Wäller et al., 2010). Die Zustände und das Verhalten der Systeme innerhalb eines Modus bleiben dennoch schwer transparent darzustellen und zu kommunizieren. Die Wahrscheinlichkeit für Mode Errors ist hier vergleichbar hoch wie in der Luftfahrt (Anthony & Degani, 1997). Dabei sind derartige Fehler nicht nur dadurch bedingt, dass eine Handlung infolge des „falschen“ Modus

zu einer unerwarteten Systemantwort führt. Sie sind auch dadurch verursacht, dass in der Situation nicht die richtigen Informationen gesucht werden (Dekker, 2006). So stellten Woods et al. (1994) fest, dass Piloten die Systemantwort auf etwaige Eingaben zwar verifizieren, vorab jedoch nicht den zugrunde liegenden Automationsmodus prüfen. Darüber hinaus muss die Flugmodusanzeige gelesen und das Gelesene interpretiert werden. Teilweise ist es hierbei essentiell, dass die fehlende Information auf dem Display gefunden wird und eine Abstraktion der Konsequenzen bei deren Abwesenheit erfolgt. Palmer (1995) empfiehlt in dem Zusammenhang, dass insbesondere in normalen, aber ungewöhnlichen Systemzuständen eine saliente Darstellung auf den Displays stattfinden muss. Die vorausberechnete Flugroute ist in der Form anzuzeigen, dass der Pilot stets weiß, dass er das erhält, was er sieht.

### **Zustandsdiagramme zur Darstellung von Modus und Transition**

Um bereits im Design- und Entwicklungsprozess derartige „Automation surprises“ zu bedenken, ist es zielführend, die menschliche Interaktion mit dem System über Zustandsdiagramme abzubilden. Jene Diagramme sind im Sinne einer spezifizierende Sprache zu verstehen, die sich für komplexe, echtzeitbasierte und reaktive Systeme wie beispielsweise Fahrerassistenzfunktionen eignet (Harel, 1988). Auf diese Art und Weise werden alle dem System zugehörigen Modi erfasst sowie die potentiellen Transitionen dazwischen anhand auslösender Ereignisspezifikationen deutlich (Harel, 1987). Damit verbunden lassen sich Hierarchieebenen mit Zuständen und Subzuständen sowie deren Beziehungen zueinander abbilden. Das somit entstandene Framework kann dann in einem weiteren Schritt als Grundlage zur Definition von Aufgaben (Belastungsfaktoren) dienen, welche der zukünftige Nutzer auf manueller, kognitiver und perzeptueller Ebene bewältigen muss. Anders ausgedrückt, ist es eine Grundlage zur Identifizierung von Szenarien, in denen ein Mismatch zwischen den Anforderungen an den Operateur und der gegebenen Modusstruktur des Systems wahrscheinlich wird (Kirlik, 1995). Derartige Entwürfe der Mensch-Computer- bzw. Mensch-Maschine-Interaktion finden sich zum Beispiel in Ansätzen wie GOMS (Goal-Operator-Method-Selection, Card, Moran & Newell, 1983), in hierarchischen Modellen (Rasmussen, 1986) oder in Funktionsnachbildungen (Jones, Chu & Mitchell, 1995), welche den Menschen als zentrales Element betrachten. Allerdings wird hierbei weniger berücksichtigt, dass die Mensch-Maschine-Interaktion in modernen Kontrollsystemen mit automatisierten Prozessen echtzeitbasiert sowie ereignisdeterminiert ist. Der Operateur muss sowohl auf externe als auch auf interne Reize reagieren, die wiederum hohe kognitive Anforderungen an ihn stellen (Sarter & Woods, 1995). Um insbesondere diese Reaktionen zu beschreiben haben Degani Shaffo und Kirlik (1995) ein reaktives Funktionsmodell namens „OFAN“ (Operator-Function-Model) entwickelt, welches sich einerseits mit den Anforderungen der Umwelt und andererseits mit den Aufgaben bzw. Funktionen des Menschen auseinandersetzt. Auf der

theoretischen Basis eines endlichen **Zustandsautomaten** (Minsky, 1967) soll hiermit ein Medium zur Verfügung stehen, mit Hilfe dessen eine Beschreibung des Kontrollverhaltens eines gegebenen Systems in Begriffen wie Zuständen und Transitionen möglich wird. Neben einer Vielzahl weiterer Beispiele (Degani & Kirlik, 1995) haben die Autoren den Anwendungsfall „Tempomat“ als Fahrerassistenz mit komplexen Zuständen durchdekliniert (vgl. Abbildung 18).

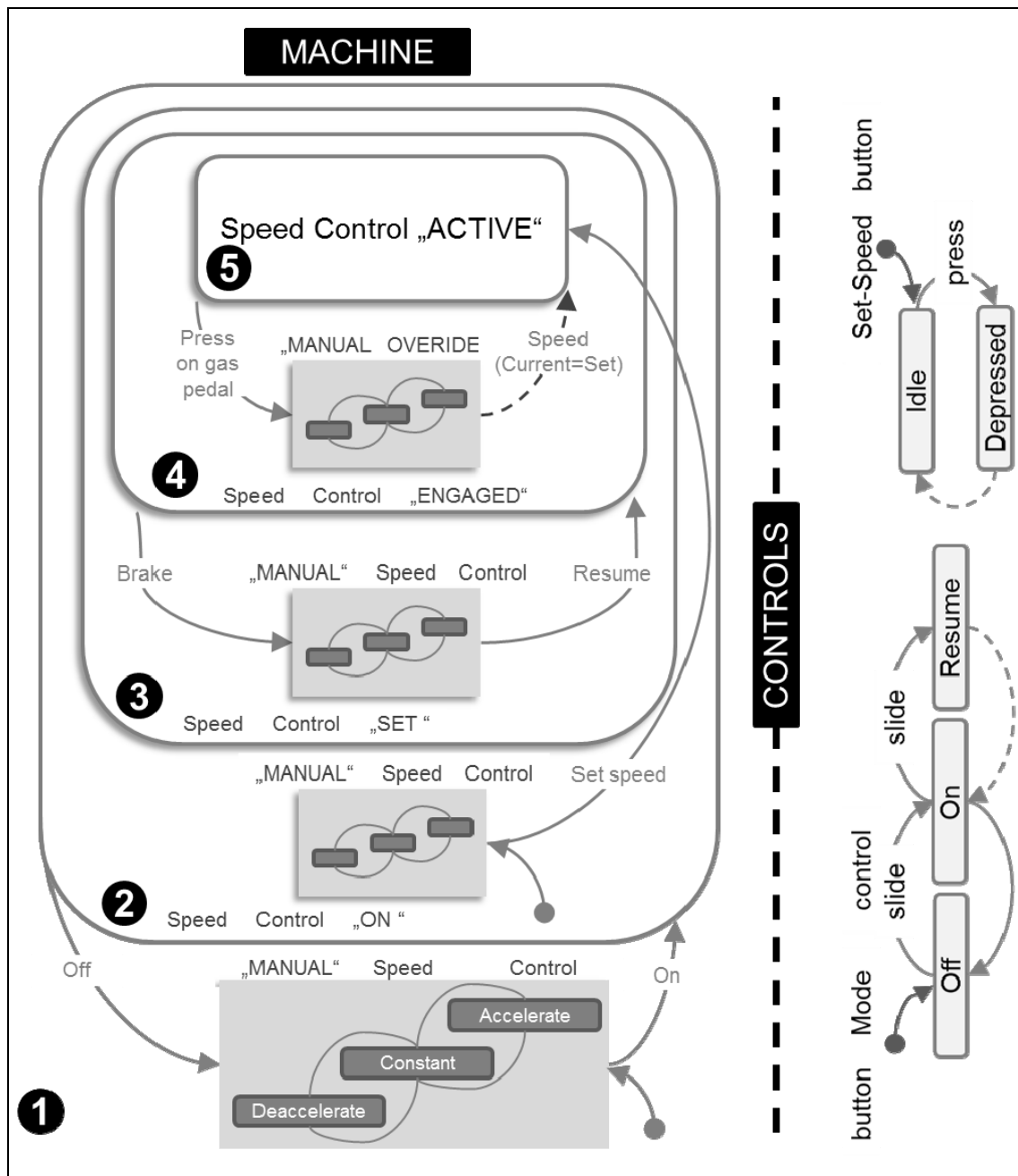


Abbildung 18: Darstellung der Zustände und Transitionen für das Fahrerassistenzsystem "Tempomat" nach Degani, Shafto & Kirlik (1996; modifiziert)

Innerhalb des Frameworks in Abbildung 18 unterscheiden die Autoren zwischen fünf aktiven Modulen, die miteinander interagieren und sich über ihre jeweiligen Zustände austauschen: (1) Umwelt, (2) Aufgabe und Funktion des Menschen, (3) Kontrolleinheit, (4) Display, (5) Maschine (Degani, Shafit & Kirlik, 1996). Dabei ist die Interaktion zwischen Mensch und Maschine entscheidend, welche fünf Stufen umfasst (vgl. Abbildung 18). Auf der Stufe 1 ist der Tempomat aus und der Fahrer kontrolliert die Längsführung eigenständig. Auf dem folgenden Level wird die Funktion zwar eingeschaltet, aber dennoch regelt der Fahrzeugführer die Geschwindigkeit. Folglich hat sich der Systemzustand geändert, die Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine ist dennoch gleich geblieben. Setzt der Fahrer nun eine Geschwindigkeit („Set“, Stufe 3) übernimmt das Fahrzeug die Aufgabe der Konstanthaltung dieser und es findet ein Übergang auf Level 5 statt. Übertritt der Fahrzeugführer das System mit dem Gaspedal erfolgt wiederum eine Transition auf Stufe 4. Auf dieser ist zu beachten, dass der Tempomat noch immer aktiviert ist und sich derzeit nur in einem passiven Zustand befindet. Jener wird sofort aufgelöst, wenn nach dem Loslassen des Gaspedals innerhalb eines definierten Zeitfensters die Setzgeschwindigkeit wieder erreicht wird (vgl. Abbildung 18, gestrichelter Pfeil von Stufe 4 zu 5). Es findet dann ein automatischer Übergang auf die darüber liegende Ebene 5 statt. War sich der Fahrzeugführer über den zuletzt aktivierten Zustand nicht mehr bewusst, könnten „Automation surprises“ die Folge sein. Ein ähnlicher Fall liegt vor, wenn der Fahrer die Bremse auf Stufe 4 oder 5 betätigt und somit auf Level 3 zurückfällt (vgl. Abbildung 18). Bei einer erneuten Reaktivierung des Tempomaten („Resume“) muss er sich an die zurückliegenden Funktionseinstellungen erinnern, da das System auf dieser Basis die Fahraufgabe wieder übernimmt.

Die Erläuterungen verdeutlichen, dass die einzelnen Subzustände nur mit einer Transition auf die Stufe 1 („Off“) vollständig ausgeschaltet werden können (Smith & Gerhart, 1988). Bei den zuletzt beschriebenen Übergängen fehlt dem Fahrer ein Detailfeedback über die Veränderung innerhalb des Funktionsmodells. Damit verbunden, fällt die Zuordnung zum aktuellen Systemzustand schwer (Sellen, Kurtenbach & Buxton, 1992). Die Wahrscheinlichkeit für Mode Errors infolge einer falschen Erwartung bezüglich des Systemverhaltens oder wegen des fehlenden Bewusstseins über den zuletzt aktivierten Zustand ist in diesen Fällen hoch ausgeprägt (Degani, Shafit & Kirlik, 1996; Anthony & Degani, 1997). Folglich stellt sich hier die Frage, ob Mode Awareness durch ein vollständiges Ausschalten einer Funktion bei fahrer- bzw. systemseitig initiierten Transitionen in geringere Automationsstufen erhöht werden kann. Dies wird unter anderem auch dadurch untermauert, dass für eine adäquate Antizipation des Systemverhaltens folgende notwendige, jedoch nicht hinreichende Voraussetzungen erfüllt sein müssen (Anthony & Degani, 1997):

- Vollständiges, genaues Modell vom System, inklusive dessen Zuständen sowie Transitionsszenarien

- Kenntnis über die internen und externen Reize, die zu Übergängen zwischen den Systemzuständen führen
- Fähigkeit die Systemzustände zu verfolgen (z.B. Display mit Zustandsanzeigen)

Fehlinterpretationen des Systemverhaltens bzw. die kognitive Fehlannahme eines anderen Modus stehen zudem häufig in Verbindung mit einer vorausgehenden Verwechslung des Systemzustandes. Diese wird in der Literatur auch als **Mode Confusion** bezeichnet und mündet zumeist in Mode Errors. Es ist eine Art von Automationsüberraschung (Automation Surprises nach Sarter et al., 1997), in der sich ein technisches System anders verhält, als vom Nutzer erwartet (Bredereke & Lankenau, 2002). Folglich glaubt er, auf einer Ebene der Handlungsausführung unterstützt zu werden, auf der keine bzw. nur begrenzte Funktionseinheiten arbeiten. Hintergrund dessen kann eine der drei folgenden Gründe sein, die nach Bredereke und Lankenau (2002) Mode Confusion klassifizieren.

- (1) Mode Confusion infolge einer inkorrekten Beobachtung des technischen Systems bzw. der Umwelt durch den Nutzer.
- (2) Mode Confusion infolge eines inkorrekten Wissens des Nutzers über das technische Systems bzw. die Umwelt.
- (3) Mode Confusion infolge einer inkorrekten Abstraktion des Nutzerwissens auf sicherheitsrelevante Aspekte der Interaktion mit dem technischen System bzw. der Umwelt.

Sicherheitsrelevant werden diese Modusverwechslungen wenn sie „Shared-Control“ Systeme betreffen, die z.B. in der Luftfahrt aber auch im Automobilkontext vorliegen. Auf der Basis einer interdependenten Beziehung erfolgt diesbezüglich die Kontrolle sowohl durch automatische Komponenten als auch durch einen Nutzer. Die alleinige Betrachtung des Systemverhaltens über eine definierte Schnittstelle (z.B. Display) würde hier nicht zielführend sein und einer Black-Box-Betrachtungsweise entsprechen (Watson, 1924). Eine Einbeziehung des Operators muss somit notwendigerweise stattfinden, damit dessen psychische und mentale Prozesse nicht vernachlässigt werden. In der kognitiven Wissenschaft besteht demgemäß Konsens darüber, dass Menschen mentale Modelle nutzen, wenn sie mit (automatischen) Systemen interagieren (Rushby, 2001). Die Herleitung und Beschreibung derartiger Repräsentationen kann z.B. über Systemzustandsdiagramme, Nutzerbefragungen oder Verhaltensbeobachtungen erfolgen (Burmester et al., 2008). Was diese Wissensstrukturen jedoch genau umfassen, erläutert der folgende Abschnitt.

### **3.2.3 Schemata und Mentale Modelle**

Wie im Kapitel 3.2.1 und 3.2.2 bereits angeführt, werden Defizite an Situation Awareness oder Mode Awareness häufig mit zwei zentralen Elementen in Verbindung gebracht. Eines



bezieht sich auf das Interface zwischen Nutzer und Maschine, welches Informationen über den aktuellen Systemstatus liefert (Norman, 1990; Billings, 1997). Das andere fokussiert Wissensstrukturen im Langzeitgedächtnis, die in Form von Schemata oder mentalen Modellen vorliegen (vgl. Endsley, 1995b; Sarter & Woods, 1995; Rushby, 1999). Diesbezüglich definiert Bartlett (1932) ein **Schema** als:

„[...] active organisation of past reactions, or of past experiences, which must always be supposed to be operating in any welladapted organic response” (Bartlett, 1932, S. 201)

Schemata sind somit unbewusste Abstraktionen vergangener Erfahrungen, die zur Interpretation von aktuellen Situationen dienen und eine Antizipation über deren Weiterentwicklung ermöglichen (vgl. Minsky, 1975; Anderson 1996). Sie leiten somit über erlernte Merkmale bzw. Eigenschaften der Situation die Wahrnehmung, Aufmerksamkeit sowie Erinnerung (Norman & Shallice, 1986). Sie modifizieren zudem über neue Erfahrungen vorhandene Schemata (Prozesse der kognitiven Anpassung nach Piaget, 1952). Innerhalb der hierarchisch angeordneten Struktur, wirken dabei zum einen so genannte Frames, die statische, räumliche Situationen und Objektszenen (z.B. Stadt) repräsentieren (Minsky, 1975). Zum anderen sind „Scripts“ beteiligt, welche sich auf konkrete Ereignisse oder Ereignisfolgen (z.B. Restaurantbesuch) beziehen (Schank & Abelson 1977). Wesentlich ist hierbei, dass es bei fehlenden Informationen über aktuelle Situationsmerkmale zu einer wissensbasierten Ersetzung in Form von prototypischen Attributen kommt (Anderson, 1996). Dies ermöglicht zwar eine schnellere Informationsverarbeitung sowie Entscheidungsfindung (Endsley, 2000; Klein, 1989), geht aber auch mit Gedächtnis- oder Wahrnehmungsfehlern einher (Fracker, 1988). Derartige Mechanismen können innerhalb dynamischer und von Mehrfachaufgaben geprägten Umwelten wie dem Straßenverkehr eine entscheidende Rolle beim Auftreten von Modusverwechslungen oder Modusfehlern spielen (Sarter & Woods, 1995). Für jenen Kontext haben vor allem **mentale Modelle** an Bedeutung erlangt (Schaumburg, 2002), welche im Sinne kognitiver Repräsentationen das Wissen über die Funktionsweise eines Systems und dessen Komponenten beinhalten (Johnson-Laird, 1983; Carroll & Olson, 1988). So werden aktuelle Informationen von Systemzuständen stets mit diesen, bereits bestehenden, übergeordneten Wissensstrukturen verglichen, klassifiziert und mit Bedeutung versehen (Norman, 1983b; Wickens et al., 2005). In Abhängigkeit von den gerade aktiven Zielen des Handelnden erfolgt daraufhin eine Aktivierung kontextabhängiger Schemata, welche über die Projektion zukünftiger Zustände den Handlungsbedarf bzw. die Handlungsauswahl determinieren (vgl. Abbildung 19).

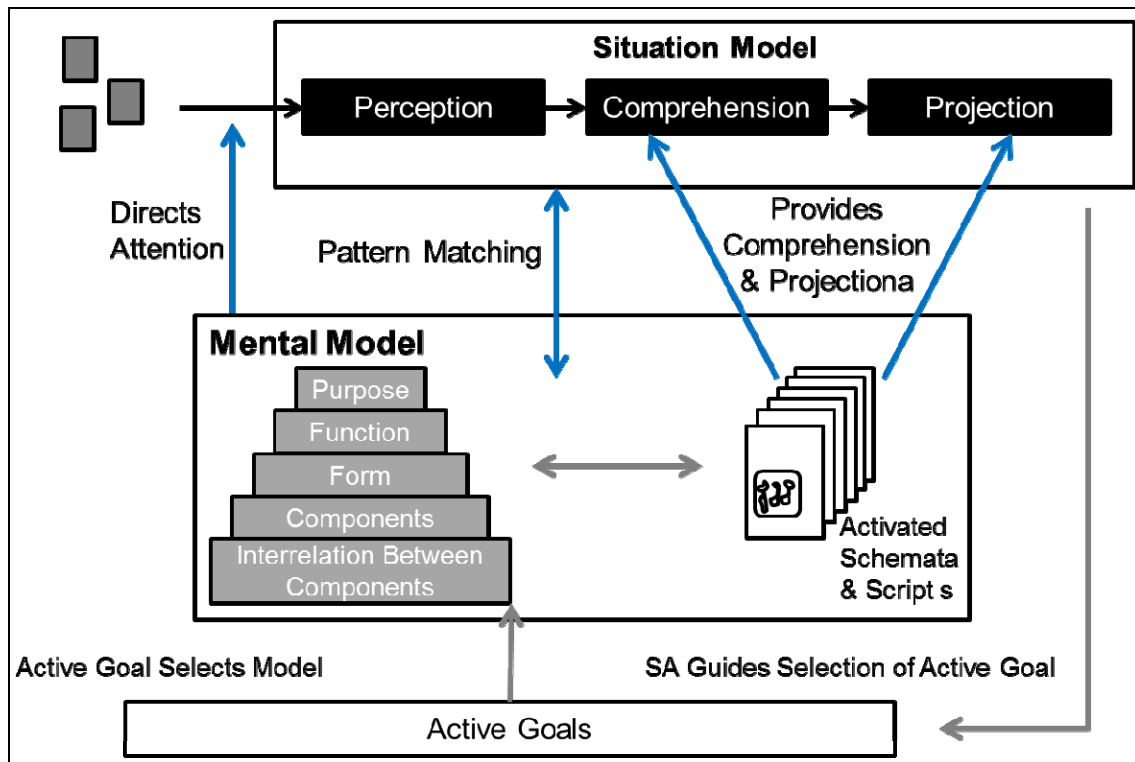


Abbildung 19: Die Bedeutung von mentalen Modellen und Schemata (Endsley, 2000; modifiziert)

Mentale Modelle wirken somit aufmerksamkeitslenkend und handlungsleitend (Hacker, 1996). Die dazwischen liegenden Entscheidungsprozesse werden durch Fertigkeiten, Regeln oder Wissen beeinflusst (Rasmussen, 1983). Intuitive und analytische Urteile sind dabei dem SA-Modell von Endsley (1995b) zuordenbar und können in dem integrierten Entscheidungsmodell nach Burmester et al. (2008) in Anlehnung an Wickens et al. (2004) Anwendung finden. Das Ergebnis der eben beschriebenen Vergleichs- und Aktivierungsprozesse ist letztlich immer ein Modell über die Situation bzw. des Systemzustands (vgl. Abbildung 19), welches sich nicht im Langzeitgedächtnis befindet und eher als „creation of the moment“ bezeichnet werden kann (Brewer, 1987; zitiert nach Durso & Gronlund, 1999). Die Güte von Mode bzw. Situation Awareness geht demnach mit der Angemessenheit jener aktivierten Teilmenge einher, deren Auswahl top-down gesteuert auf generischen Wissensstrukturen basiert (Kluwe & Haider, 1990). Adäquate mentale Modelle sind somit als Vorbedingung für Situations- und Modusbewusstsein anzusehen (Sarter & Woods, 1991; Mogford, 1997). Der Hauptfokus liegt primär auf der Befähigung des Menschen, das Verhalten eines Systems zu verstehen und vorhersagen zu können (Williams, Hollan & Stevens, 1983). Für effiziente Entscheidungs- und Handlungsprozesse müssen sie folglich sowohl typische als auch weniger typische Systemzustände umfassen und sich flexibel an verändernde Kontextbedingungen anpassen. Nach Norman (1983b) sind mentale Modelle jedoch in den meisten Fällen unvollständig, instabil und zum Teil unlogisch. Kontrovers zu konzeptuellen Modellen

spiegeln sie daher nur selten ein exaktes, konsistentes und vollständiges Bild der Realität wider (Norman, 1983b). Zudem besteht eine gewisse Änderungsresistenz vorhandener Repräsentationen (Dutke, 1994). Wissenslücken infolge unzureichender Erfahrung oder mangelnder Einsicht in den Prozess verstärken darüber hinaus den Aufbau inadäquater mentaler Modelle. So sind Unterschiede in den kognitiven Strukturen zwischen Experten und Novizen nachweisbar (vgl. Doane, Pellegrino & Klatzky, 1990; Mayer, 1997; Preim, 1999; Willmes-Lenz, 2003). Der Rückgriff auf Vorwissen prägt zudem den Lernverlauf (vgl. Stumpf, 2000; Totzke & Krüger, 2003; Simons, 2005) und kann bei Verletzung der Nutzererwartung zu erhöhtem Lernaufwand, Fehlbedienungen und sinkender Akzeptanz führen (Totzke et al., 2004). Daneben limitiert eine mangelhaft gestaltete Mensch-Maschine-Schnittstelle das aktive Nachvollziehen von Prozessabläufen sowie Systemzuständen und verhindert in der Folge die Effizienz von Lernprozessen (Norman, 1989, 1990; Wagenaar & Keren, 1986; Cook et al., 1991; Sarter & Woods, 1994, 1995; Buld & Krüger, 2003). Das mit zunehmender Automatisierung zumeist einhergehende, eingeschränkte bzw. fehlende Feedback an den Bediener nimmt dabei eine Sonderstellung ein (vgl. Kapitel 3.2.4). So wirkt jenes beim Fertigkeitserwerb, der Aktualisierung und Erweiterung des mentalen Modells wesentlich mit (z.B. Norman, 1990; Anderson, Magill & Sekiya, 2001; Schmidt & Lee, 1999; Stanton & Young, 2000). Geringfügige Verzögerung der Systemrückmeldungen gehen mit entscheidenden Handlungseinbußen einher (Wickens & Holland, 2000). Adäquates Feedback ist essentiell für die Entwicklung von Systemvertrauen (Muir & Morray, 1996).

Zusammenfassend können also die Faktoren „Interface“ und „mentales Modell“ die Fähigkeit des Menschen begrenzen, aktuelle Zustände bzw. Systemmodi nachzuvollziehen und deren weitere Entwicklung zu antizipieren. Es besteht demnach die Gefahr, dass Erwartungen nicht erfüllt bzw. falsche geweckt werden. Konfusionen oder Mode Errors können die Folge sein (vgl. Palmer, 1995; Jones, 1997). Ergänzt man die zwei Einflussgrößen um ein Satz an Aufgaben, welches der Nutzer durchführen muss, um mit der Maschine zu interagieren, ergibt sich folgende, vereinfachte **Repräsentation der Mensch-Maschine Interaktion** (Abbildung 20, links nach Degani & Heymann, 2000; modifiziert). Das Zusammenspiel zwischen Nutzer und System kann demnach nur reliabel und korrekt ausfallen, wenn alle drei kreisförmigen Elemente konsistent zueinander sind. Dies ist im konkreten Fall für die Überlappungen in der Region 1 gegeben. In der Region 2 der Abbildung 20 (links) liegt eine Situation vor, in der die Aufgaben und das Modell des Nutzers korrekt und eindeutig definiert sind. Das Interface hingegen liefert nur inadäquate Informationen über den Systemstatus. „Errors of omission“ könnten die Folge sein (Sarter & Woods, 1995).

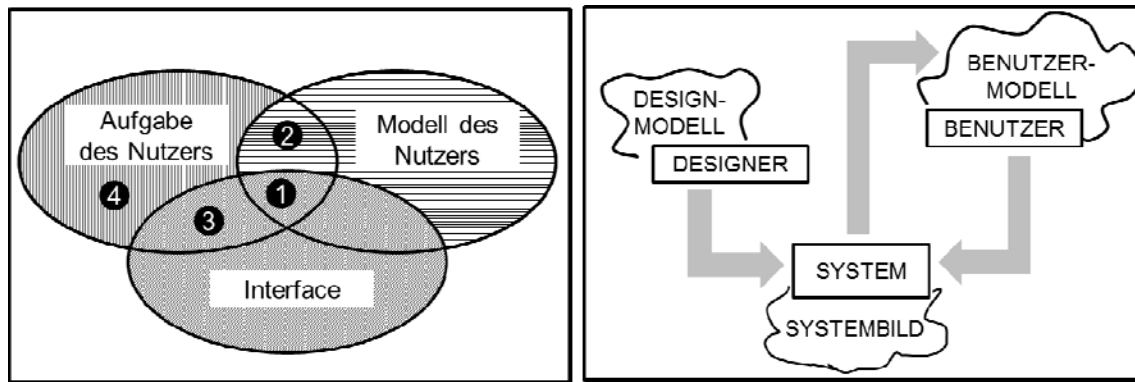


Abbildung 20: Zwischenbeziehungen zwischen drei Basiselementen einer reibungslosen Mensch-Maschine-Interaktion (links; Degani & Heymann, 2000; modifiziert) sowie Designmodell, Benutzermodell und Systembild (rechts; Norman, 1989; modifiziert)

Ein weitaus stärkeres Hindernis für eine reibungslose Mensch-Maschine-Interaktion betrifft allerdings den Fall, wenn das Nutzermodell inkorrekt bzw. unvollständig ist (Region 3, Abbildung 20, links). Das heißt, das beim Bediener repräsentierte Modell entspricht nicht den tatsächlichen Zuständen und Aktionen des Systems (Automation Surprises nach Billings, 1997). Eine antizipative Handlungssteuerung sowie -absicherung kann auf Grund des vorliegenden Mismatch zwischen dem mentalen Nutzermodell und dem konzeptuellen Systemmodell daher nicht stattfinden (Degani & Heymann, 2000). Norman (1983b) spricht in diesem Zusammenhang von einer fehlenden **Passung zwischen Benutzermodell und Designmodell** (vgl. Abbildung 20, rechts). Diesbezüglich ist zu beachten, dass Nutzer von technischen Systemen kognitive Strukturen aufbauen, welche in den ersten Lernphasen über naive Theorien bzw. generalisierte Erwartungen definiert sind (Norman, 1983b; Rudin-Brown & Parker, 2004). Sie entsprechen folglich eher nicht dem Abbild des Systems in den Vorstellungen von Systementwicklern oder Forschern (vgl. Kluwe & Haider, 1990; Sasse, 1997; Kazi et al., 2007). Da die Modelle der Designer und Benutzer zudem nicht in direktem Zusammenhang stehen, muss die Bildung eines adäquaten Modells beim Nutzer über das Produkt (System) selbst unterstützt werden. Diese essentielle Schnittstelle bezeichnet Norman (1983b) als „Systembild“ (vgl. Abbildung 20, rechts). Es ist die vom Designer entwickelte Repräsentation des Systems und sollte für den Aufbau eines angemessenen Systemwissensmodells möglichst alle funktionsabhängigen Informationen zur Bedienung, zum Verhalten, zum Zustand und zu Grenzsituationen enthalten. Da an jener Stelle die Hauptverantwortung für eine geeignete Bildung des mentalen Modells des Nutzers liegt, ist hierüber eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Benutzer- und Designermodell anzustreben (vgl. Streitz, 1990; Dutke, 1994; Rasmussen, Pejtersen & Goodstein, 1994; Vicente, 1999). In der gängigen Praxis findet sich jedoch eher eine mehr oder weniger intensive Analytik und Dokumentation, aus der dann eine Systemspezifikation abgeleitet und letztlich die Systemrealisierung gebildet wird (Herczeg, 2006). Woods et al. (1987) haben in diesem Zusammenhang die Erwar-

tungen von Entwicklern neuer Automatisierungstechniken den Problemen, die in der Praxis auftreten gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, dass vor allem bei der Entwicklung von Systemen zur Prozess- und Fahrzeugführung die Ziele, Vorstellungen und Erfahrungen von Nutzern vs. Entwicklern zumeist nur teilweise miteinander verträglich sind (vgl. **Mensch-Automatisierungs-Kompatibilität** nach Flemisch et al., 2008). Die Folge sind Fehlwahrnehmungen oder Fehlhandlungen des Bedieners, die auf falsche Erwartungen bzw. Annahmen beruhen und zu Unfällen führen können (vgl. Dutke 1994; Preece, Rogers & Sharp, 2002; Herczeg, 2004). Die begleitende und frühzeitige Identifizierung derartiger Inkompatibilitäten sollte somit eine besondere Stellung in der Konzeptionsphase des Designprozesses einnehmen (vgl. Rushby, 2001; Vakil & Hansamn, 2002). Laut Bubb (1993b) muss diesbezüglich eine Passung zwischen der Gestaltung der Stellteile sowie Anzeigen (äußere Kompatibilität) und den Vorstellungen des Menschen vom System (innere Kompatibilität) bestehen. Eine geringe Kompatibilität erhöht die kognitive Arbeitslast des Bedieners durch die notwendige Transformation von Aufgabenparametern in nutzbare mentale Repräsentationen (Timpe, 1990). Aus psychologischer Sicht entspricht dies einem wissensbasierten Handeln (Problemlösen), das die Aufmerksamkeit und die mentalen Kapazitäten beansprucht (Rasmussen, 1983). In Anbetracht der zunehmenden Komplexität und Automatisierung von Systemen gewinnt somit vor allem die Forderung nach einfachen, leicht zu erlernenden Systemmodellen an Bedeutung (Norman, 1988; Deutsches Institut für Normung, 2006). Sie sollte daher auch die Automobilindustrie und insofern die zukünftige Bandbreite an automatisierten Fahrfunktionen adressieren, welche durch zahlreiche Übergabe- sowie Übernahme-situationen charakterisiert sein wird (vgl. Kapitel 2.1.4). Gerade bei Transitionen mit Bedarf an schnellen und effizienten Reaktionen zeichnet sich die Gebrauchstauglichkeit eines Systems (DIN EN ISO 15005, 2000; DIN EN 292-1, 1991) durch die Kenntnis von aktuellen und zukünftigen Systemzuständen sowie transitionsauslösenden Bedingungen aus (Sarter & Woods, 1992, 1994). Das innere Modell des Fahrers muss dabei keineswegs ein physikalisch korrektes Abbild der Funktion sein. Es kann vielmehr durch Metaphern und Bilder aus der Erfahrung des Nutzers ergänzt bzw. determiniert werden. Wichtig ist, dass das Modell die situationsspezifischen Funktionsgrenzen sowie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen einzelnen Systemen enthält. Dafür bedarf es zum einen der Identifizierbarkeit von generalisierbaren bzw. differierenden Kriterien, zum anderen der Berücksichtigung einer **Aufwärts- und Abwärtskompatibilität** neuer Systeme (Flemisch et al., 2007). Hierbei ist besonders zu beachten, dass Nutzer durchaus ähnliche Erwartungen an die Funktionalität verschiedener Systeme setzen, sofern diese für sie einen gemeinsamen Betrachtungsgegenstand bilden (Helmer et al., 2008). Da mentale Modelle zudem kontextabhängig sind, ist es erforderlich, sie in derjenigen Umgebung zu untersuchen, in welcher sie gebildet und eingesetzt werden. Im Kern der Analyse sollte hier die Frage stehen: Weiß der Nutzer zu

jeder Zeit, wer was gerade wie tut. Eine derartige Erhebung des Inhaltes und des Aufbaus mentaler Benutzermodelle bei der Interaktion mit dem System bezeichnet Norman (1983b) als Konzeptualisierung. Jene soll im Sinne eines Cognitive Engineerings (Norman, 1986) ebenso Bestandteil der vorliegenden Arbeit sein und sich auf spezifische Übergabe- bzw. Übernahme-situationen innerhalb ausgewählter Stufen an Automation beziehen (vgl. Kapitel 4). Die spezifischen Auswirkungen der Transitionen sind dabei aber stets in Kombination mit denen der Automation zu beachten (vgl. Kapitel 3.2.4, 3.2.5).

### **3.2.4 Auswirkungen von Automation**

Obwohl Automation auch durch positive Effekte wie der Abnahme von Workload oder der Verbesserung der Leistung gekennzeichnet ist (vgl. Brockmann et al., 1995; Fancher et al., 1997; Peters, 1996; Fancher & Ervin, 1998; Nilsson, 1995; Weinberger, 2001; Lorenz et al., 2001) wurden vor allem in der Luftfahrt und in anderen Bereichen wie der Schifffahrt, der Medizin, dem Bahnverkehr sowie der Atomindustrie typische Automatisierungsprobleme identifiziert (vgl. Billings, 1997; Endsley & Kiris, 1995; Endsley, 1997; Endsley & Kaber, 1999; Jones & Endsley, 1996; Parasuraman & Mouloua, 1996; Wickens & Holland, 2002). Diese lassen sich in ersten Ansätzen gleichfalls auf den Automobilkontext übertragen (vgl. Ward, 2000; Weinberger, 2001; Buld et al., 2002; Ma & Kaber, 2005). Als wesentliche Faktoren einer automationsbedingten Veränderung der Rolle des Menschen (vgl. Kapitel 3.1.3) gingen hierbei die folgenden fünf Punkte hervor. Diese werden zugleich als Hauptmechanismen für ein Defizit an Mode bzw. Situation Awareness angesehen und sind mit Übernahme-problematiken verbunden:

- (1) Reduktion der Vigilanz (Daueraufmerksamkeit)
- (2) Überhöhtes Vertrauen in die Automation (Complacency)
- (3) Veränderung der Qualität und Art des Feedbacks an den Operateur
- (4) Verlust der manuellen Fähigkeiten
- (5) Verhaltensanpassung

Bezüglich der **Vigilanzverringerung** zeigte sich, dass diese sowohl in einfachen als auch komplexen Überwachungsaufgaben mit passiver Funktion des Operators zu einer Vielzahl an unzulänglichen Reaktionen auf Systemausfälle führten (vgl. Wickens, & Kessel, 1979; Ephrath & Young, 1981; Billings, 1991; Parasuraman & Riley, 1997). Fehler des Menschen wurden vor allem bei geringen und moderaten Beanspruchungsleveln gefunden (vgl. Kinney, Spahn, & Amato, 1977; Schroeder & Nye, 1993), traten jedoch auch unter hohen Workloadbedingungen auf (Endsley & Rodgers, 1998). Neben der Unterforderung spielen die Kosten mentaler Operationen und unzureichende Handlungspläne eine bedeutsame Rolle (Sanders et al., 1983). Endsley und Kiris (1995) betonen in diesem Zusammenhang vor allem den

negativen Einfluss der Automation auf dem Level 2 von Situationsbewusstsein, d.h. der Verstehensebene. So war diese bei einer Navigationsaufgabe unter voll- bzw. teilautomatisierten Bedingungen stärker eingeschränkt als im Vergleich zur reinen manuellen Leistung. Das Fehlen von aktiven Entscheidungen scheint hierbei eine moderierende Variable zu sein (Mogford & Tansley, 1991; Endsley & Kiris, 1995). In geringer Ausprägung und kombiniert mit hoher Beanspruchung hat sie bereits im Arbeitskontext zu gesundheitsschädlichen Effekten geführt (Karasek & Theorell, 1990). Für den Fahrkontext stellten Buld et al. (2005) darüber hinaus fest, dass deutliche Vigilanzabfälle bei sehr hoher Automation schon innerhalb der ersten 45 min Fahrtdauer auftreten. Die Durchführung von Nebentätigkeiten scheint jedoch dabei einen arousalerhöhenden Effekt bei Fahrten mit hochautomatisierten Systemen zu haben (Schömig et al., 2015). Bei manueller Fahrt wurden Vigilanzminderungen hingegen erst nach drei Stunden als Folge der Dauerbeanspruchung dokumentiert (Hogema, Van der Horst & Jansen, 1994). Othersen, Petermann-Stock und Vollrath (2014) finden bei der Analyse von teilautomatisierten Systemen einen derartigen Einbruch in der Überwachungsleistung sogar ab einer Schwelle von 15 min Fahrtdauer.

Ein weiterer Grund für Defizite in der Mode bzw. Situation Awareness ist das Auftreten von **Übervertrauen** (Complacency) in die Automation (vgl. Parasuraman, Molloy & Singh, 1993; Riley, 1994; Endsley, 1996; Wickens & Holland, 2000; Lee & See, 2004). Begünstigende Faktoren sind hierbei laut Manzey und Bahner (2005) eine hohe Reliabilität des Systems (Automationsmerkmale) sowie die Neigung des Fahrers zu Langeweile (Personenmerkmal). Damit Complacency als Disposition in ein entsprechendes Verhalten mündet, müssen allerdings situative Faktoren wie ungünstige Gestaltungen des Mensch-Maschine-Systems hinzukommen (Bahner & Manzey, 2004). Übervertrauen kann daneben zur Aufmerksamkeitsausrichtung auf aufgabenirrelevante Reize führen (Parasuraman et al., 1993). Dies hat zur Folge, dass bedeutungsvolle Reize oder Zustände der Automation übersehen werden (Parasuraman, Mouloua & Molloy, 1994). Belege aus dem Fahrkontext zu assistierten bzw. teilautomatisierten Systemen untermauern derartige Befunde mit höheren Blickzuwendungen auf Sekundäraufgaben oder längeren Blickabwendungen von der Straße (vgl. Becker, Sonntag & Krause, 1994; Gugerty, 1997; Risser & Lenhner, 1997; Stanton & Young, 1998; Buld et al., 2002). Darüber hinaus berichten einige Autoren von ignorierten Systemalarmen, die infolge vorausgehender Fehlalarme zu einem „lack of trust“ beim Operateur geführt haben (vgl. Wiener & Curry, 1980; Billings, 1991; Dingus et al., 1997; Buld et al., 2005).

In Ergänzung hierzu findet sich häufig das eingeschränkte bzw. fehlende **Feedback** als Hauptproblem zunehmender Automation (vgl. Norman, 1989, 1990; Wagenaar & Keren, 1986; Cook et al., 1991; Kolbig & Müller, 2013). So wird beispielsweise der veränderten,

propriozeptiven Wahrnehmung hohe Bedeutung zugemessen (vgl. Kessel & Wickens, 1982; Dorißen & Höver, 1996; Fancher & Ervin, 1998; Buld et al., 2002). Obwohl jene für die Handlungssteuerung entscheidend ist, geht mit steigendem Automationsgrad zumeist eine negative Veränderung der Qualität und Menge an haptischen sowie kinästhetischen Informationen einher. Diese Automationseffekte führten in der Folge dazu, dass wieder verstärkt aktive Bedienelemente genutzt bzw. deren Wirkungen untersucht wurden (vgl. Kantowitz & Sorkin, 1983; Brockmann et al., 1995; Penka, 2000; Lange, 2007). Daneben sind bei komplexen Displaydarstellungen saliente Informationen für den Nutzer oftmals kaum transparent, da sie sich zumeist in Untermenüs befinden oder mit verschiedenen Systemmodi assoziiert sind (Endsley, 1996, 2000). Der Status der Automation und ihrer Parameter ist somit nicht eindeutig identifizierbar. Der Bediener kann im Bedarfsfall keine effizienten Entscheidungen treffen oder angemessene Handlungen ausführen.

Diese Problematik entsteht auch, wenn die Automation dem Bediener längerfristig die Entscheidungsfindung abnimmt (Parasuraman et al., 2000). **Fertigkeitsverluste** infolge fehlender Übung und der Abbau von kognitiven sowie manuellen Kompetenzen können die Folge sein (Manzey, 2008). So stellte Schiff (1983) fest, dass Operateure, die lediglich eine Überwachungsrolle im Mensch-Maschine-System einnahmen, sehr viel langsamer und ineffizienter auf Übergabesituationen reagierten (vgl. Ward, 2000; Buld et al., 2002). Dies belegen ebenfalls aktuelle Meldungen zu Flugunfällen, in denen Piloten Warnsignale für Fehler beim automatischen Landeanflug übersahen (Focus online, 2014) oder notwendige Handlungen infolge falscher Situationseinschätzungen zu spät einleiteten (Focus online, 2014). Im Zusammenhang mit Fahrerassistenzsystemen sollten sich allerdings weniger die manuellen, als eher die kognitiven Einbußen andauernder Automation auswirken (Patrick, 1992, zitiert nach Manzey, 2008).

Eine besondere Bedeutung nehmen zudem **Verhaltensanpassungen** im Sinne der Adaptation des Verhaltens an Veränderungen in der Umwelt ein. Deren Bedeutung wird stets im Kontext der eigenen Ziele und Motive analysiert (OECD, 1990). Hat der Mensch noch Regulationsmöglichkeiten zur Verfügung, können unter bestimmten Bedingungen (vgl. Prozessmodell von Weller & Schlag, 2004) negative Anpassungen resultieren, welche die intendierten Sicherheitseffekte der Automation nivellieren (Elvik & Vaa, 2004). Derartige Effekte konnten für den Fahrkontext bereits vielfach dokumentiert werden (Vrolix, 2006) und liegen auch für die Interaktion des Fahrers mit Fahrerassistenzsystemen vor (vgl. Aschenbrenner, Biel & Wurm, 1992; Risser & Lehner, 1997; Hoedemaeker & Brookhuis, 1998; Stanton & Young, 1998; Buld et al., 2002; Rudin-Brown & Parker, 2004; Saad, 2004; Dragutinovic et al., 2005; Stottke, 2007; Merat & Jamson, 2009; Vollrath, Briest & Oeltze, 2010).



### **3.2.5 Auswirkungen von Automation und Transition**

Die beschriebenen Effekte von Automation gewinnen in Anbetracht der aktuellen Entwicklungen im Automobilbereich in Richtung einer zunehmenden Automatisierung von Fahraufgaben (vgl. Kapitel 2.1.3) besonders an Gewicht. Vor allem in Kombination mit höheren Automatisierungsstufen sowie der Synthese von Assistenz und Automation rückt diesbezüglich auch die Gestaltung von Übergabe- bzw. Übernahmeprozessen immer stärker in das Blickfeld der Human-Factors Forschung (Stanton & Marsden, 1996). Die aktuellen Arbeiten aus diesem Bereich fokussieren jedoch überwiegend nur eine bestimmte Richtung von Transitionen: die komplette Übergabe der Fahrzeugkontrolle von der Automation an den Fahrer. Sie adressieren dabei vornehmlich die Fähigkeit des Menschen, Systemausfälle oder Grenzsituationen zu beherrschen (vgl. Hogema, Van der Horst & Jansen, 1994; Nilsson, 1995; Nirschl & Kopf, 1997; Fancher & Ervin, 1998; Stanton & Young, 1998; Weinberger, 2001; Furukawa et al., 2003; Rajaonah, Anceaux & Vienne, 2006; Neukum et al., 2008; Kleen, 2014). Die Mehrzahl der gewonnenen Ergebnisse beziehen sich primär auf die Interaktion des Fahrzeugführers mit einer **Einzelfunktion**. So finden sich für das Fahrerassistenzsystem ACC Studien zur Interaktion des Fahrer mit der Funktion für unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche (Winner et al., 2009), Systemauslegungen (Buld et al., 2002; Furukawa et al., 2003) oder Systemzuständen (Pauwelussen & Minderhoud, 2008). Diesbezüglich zeigt sich im Allgemeinen, dass Fahrer nach einer relativ kurzen Nutzungsdauer (ca. zwei Wochen) mit Übernahme-situationen an Systemgrenzen umgehen können (vgl. Becker, Sonntag & Krause, 1994; UMTRI, 1997; Fancher et al., 1998; Weinberger, 2001). Fälle, in denen das ACC immer abwirft, können dabei schneller gelernt und in das Benutzermodell integriert werden (vgl. Nirschl & Kopf, 1997; Weinberger, 2001). Treten Situationen ein, die nur selten vorkommen (z.B. Regelung auf ein bereits stehendes Fahrzeug), werden diese subjektiv als bedrohlich wahrgenommen, führen aber nicht zu Fehlhandlungen oder ausbleibenden Reaktionen (Neukum et al., 2008). Als wesentlicher Indikator für ein vollfunktionsfähiges Systems haben sich hierbei kinästhetische Informationen erwiesen, welche dem Fahrer über die Eingriffsstärke beim Bremsen und Beschleunigen subjektive Sicherheit geben können (vgl. Dorißen & Höver, 1996; Nirschl & Kopf, 1997; Fancher & Ervin, 1998; Landau & Weiße, 2001; Buld et al., 2002). Daneben zeigte sich jedoch auch, dass Fahrer bei Beteiligung des ACC die Tendenz haben, die Systemreaktionen einfach laufen zu lassen (vgl. Chaloupka et al., 1998; Risser & Lehner, 1997; „Mietzieheffekt“ nach Buld et al., 2002). Reize, die für die Überwachung des Systems nicht relevant waren, wurden in jenen Fällen nicht mehr in angemessener Art verarbeitet und führten zu einem reduzierten Situationsbewusstsein (Buld et al., 2002). Außerdem konnten in einigen Arbeiten verzögerte und stärkere, manuelle Reaktionen auf Systemausfälle oder in Grenzsituationen dokumentiert werden (vgl. Nilsson & Nabo, 1994; Nilsson, 1995; Hogema et al., 1997; Fancher et al., 1998; Buld et al.,

2002; Niederée & Vollrath, 2009; Vollrath, Briest & Oeltze, 2010). Buld et al. (2005) sehen hierbei zum einen den schnellen Übergang von einer niedrigen Aktivierung (Überwachungstätigkeit) zu einer hohen Aktivierung (Systemübernahme), zum anderen den Vigilanzabfall infolge der Automatisierung als Hauptgründe für die verlängerten Reaktionszeiten. Des Weiteren blieben in anderen Studien die Reaktionen der Fahrer aufgrund einer inkorrekten Vorhersage des ACC Verhaltens in verschiedenen Systemzuständen aus (Furukawa et al., 2003; Horiguchi, Fukuju & Sawaragi, 2006). Mode Awareness Probleme können diesbezüglich als Ursache identifiziert werden und äußerten sich zumeist in Form von Modusverwechslungen (Furukawa et al., 2003; Horiguchi et al., 2006).

In Ergänzung zu diesen Befunden finden sich in der Literatur auch einige Studien zur Wirkung von Transitionen bei Systemauslegungen, die eine **kombinierte Längs- und Querführung** aufwiesen (vgl. De Vos & Hoekstra, 1997; Bloomfield et al., 1998; Merat & Jameson, 2009; Schömig & Kaussner, 2010; Damböck et al., 2012; Gold et al., 2013; Petermann-Stock et al., 2013; Othersen, Petermann-Stock & Vollrath, 2014; Kleen, 2014). Diese berücksichtigen einerseits das teilautomatische (Gold et al., 2013; Othersen et al., 2013) und das hochautomatische Fahren (Damböck et al., 2012; Petermann-Stock et al., 2013). Andererseits integrieren sie zudem teilweise Übergänge vom Fahrer zur Automation (vgl. Buck & Yenamendra, 1997; Levitan et al., 1998; Lindberg, Schaller & Gardenegger, 2007; Flemisch et al., 2008; Schieben, & Flemisch, 2008; Toffetti et al., 2009) sowie innerhalb einer Automationsbandbreite (Schieben et al., 2010). In den Arbeiten zeigte sich, dass insbesondere bei der Umsetzung hochautomatisierter Systeme eine hohe Systemverfügbarkeit gewährleistet werden muss. Obwohl kritische Situationen ausblieben, konnten verzögerte Reaktionen der Fahrer sowie deutliche Kompensationshandlungen an den Systemgrenzen festgestellt werden (vgl. Lindberg et al., 2007; Merat & Jameson, 2009; Toffetti et al., 2009; Damböck et al., 2012). Daneben finden sich Parallelen zum „Out-of-the-Loop-Phänomen“, die sich im Verpassen von „Go-Request“, d.h. Anfahrtsbestätigungen nach 3 sec Standzeit verdeutlichen (Lindberg et al., 2007). Scheiben & Flemisch (2008) ergänzen diese Befunde um die Schwierigkeit des Fahrers, Vorbedingungen für eine Systemaktivierung zu differenzieren. Jene betrafen vor allem funktionsseitige Geschwindigkeitsgrenzen (max. 120 km/h) und infrastrukturelle Aspekte wie einer Sonderfahrspur für die Automation (Furukawa et al., 2003). Im ersten Fall führten die falschen Erwartungen des Fahrers sogar bei zwei von sechs Personen zur Verwechslung des aktuellen Systemzustands. Sie bedingten eine unangemessene Wegnahme der Hände vom Lenkrad (Schieben & Flemisch, 2008). Weiterhin konnte bei Transitionen mit Deaktivierung eines Systems festgestellt werden, dass ein schrittweiser Transfer eher zu Problemen bei der Übernahme durch den Fahrer führt (De Vos & Hoekstra, 1997; Bloomfield et al., 1998; Gold et al., 2013). Eine Kontrollrückgabe mit vollständigem

Abwurf der Unterstützung in Längs- und Querrichtung wirkte sich hier positiver aus. Erfolgen derartige Transitionen jedoch in für den Fahrer unvorhersehbaren, zeitkritischen Situationen, kann dessen Reaktion durchaus negative Effekte zeigen (Schömig & Kaussner, 2010).

Zusammenfassend liegen bereits einige Arbeiten vor, welche Transitionen zwischen dem Fahrer und definierten Automationsstufen betrachtet haben. Allerdings beschränken sich diese zumeist nur auf Übergabe- und Übernahme-situationen zwischen zwei Automations-leveln. Jene betreffen überwiegend die manuelle versus eine teil- bzw. hochautomatisierte Fahrt mit integrierter Quer- und Längsführung. Um Phänomene wie Mode Confusion für den Fahrkontext differenzierter zu untersuchen, bedarf es jedoch einer komplexeren Herangehensweise. Diese sollte zum einen mehrere Automationsstufen beinhalten und Bezug zu aktuellen Entwicklungen im Fahrzeugsektor aufweisen (vgl. Kapitel 2.3). Zum anderen müssen Transitionsszenarien integriert werden, die sowohl Aktivierungs- als auch Deaktivierungsfälle betrachten. Diese sollten außerdem die gesamte Bandbreite der integrierten Automationsstufen betreffen. Darüber hinaus sind die Effekte von Automation und Transition auch in realen Verkehrssituationen zu untersuchen sowie deren vorausgehende Nutzermodelle zu erheben. Die Erfassung von Annahmen bzw. Erwartungen ist dabei um Parameter des Fahrerverhaltens und des Fahrerzustands in Übergabe- sowie Übernahme-situationen zu erweitern. Aufgrund der geringen Erkenntnislage ist hier offen, ob und wie sich Mode Confusion im Fahrzeugkontext ausdrückt.

### **3.3 Fazit**

Im Kapitel 3 wurde die zunehmende Automatisierung im Fahrkontext unter psychologischem Blickwinkel erörtert. Auf Basis dieser Ausführungen können weiße Flecken zukünftiger Automatisierungsbestrebungen herausgearbeitet und ein **Rahmenkonzept für die vorliegende Arbeit** abgeleitet werden. Hierfür finden sich im Folgenden aufeinander aufbauende Prämissen, welche die wesentlichen Aspekte aus Sicht des Fahrers zusammenfassen. Sie führen gleichzeitig zum Schwerpunkt der Arbeit in dessen Fokus die mit der Automation einhergehenden, Veränderungen im Bewusstsein über die vorliegende Situation (vgl. Kapitel 3.2.1) sowie über den gerade aktiven Systemmodus (vgl. Kapitel 3.2.2) stehen. Das Konstrukt Mode Awareness nimmt dabei eine besondere Stellung ein.

**Prämisse 1:** Automatisierung geht immer mit einer Allokation von Funktionen und folglich mit Veränderungen in der Aufgabenverteilung im Mensch-Maschine-System einher.

**Prämisse 2:** Führt der Fahrer nicht mehr aktiv die Regelungstätigkeit aus, kann dies zu fehlerhaften Erwartungen über das Systemverhalten und zu einem mangelnden Verständnis von Systemzuständen führen.

**Prämisse 3:** Inkonsistenzen im mentalen Systemmodell des Nutzers oder ein geringes System- bzw. Modusbewusstsein können zu Verwechslungen von Systemzuständen, inkorrekten Generalisierungen oder Handlungsfehlern führen.

**Prämisse 4:** Derartige Phänomene, welche unter dem Begriff „Automation Surprises“ zusammenfassbar sind, verstärken sich bei der Interaktion mit komplexen Systemen, die aus automatisierten Teilfunktionen bestehen und durch zahlreiche Wechsel von Systemmodi gekennzeichnet sind.

Gemäß diesen Prämissen fokussiert die vorliegende Arbeit im Kern die Frage: Weiß der Nutzer zu jeder Zeit, wer was gerade wie tut? Im Fokus der Betrachtung steht somit das **Modusbewusstsein**, d.h. das Wissen um aktuelle sowie zukünftige Zustände des Systems (vgl. Kapitel 4). Es geht um den Abgleich der Erwartungen des Nutzers mit dem realen Systemverhalten und um die Identifizierung von Phänomenen wie **Mode Confusion** oder Mode Errors. Diese Faktoren moderieren entscheidend die effiziente Rückübernahme der Fahrzeugkontrolle in Übergangssituationen und sind daher auch hier Bestandteil. Die Rahmenbedingungen sind durch den eher technischen Fokus der Arbeit in Form eines mehrstufigen Automationsansatzes mit Übergängen in Richtung Fahrer und Automation gegeben (vgl. Kapitel 2.3). Für automobilspezifische Schlussfolgerungen ist allerdings wichtig, dass die betrachteten Übergangssituationen auf der einen Seite in realistischen Szenarien aus dem Fahrkontext eingebettet sind. Auf der anderen Seite sollten sie aus der Literatur bekannte Merkmale für Situationen abbilden, die mit erhöhter Wahrscheinlichkeit „Automation Surprises“ bedingen.

Den genannten Rahmenbedingungen widmet sich der folgende Abschnitt. Beginnend bei der Definition von allgemeinen Fragestellungen (Kapitel 4.1) werden im Kapitel 4.2. die Kriterien des Untersuchungsansatzes der vorliegenden Arbeit festgelegt. Daran anschließend geht das Kapitel in die spezifischen Fragestellungen über (Kapitel 4.3) und gibt im letzten Abschnitt einen Ausblick über die empirischen Studienansätze der Arbeit (Kapitel 4.4).

## 4 Forschungsschwerpunkt der Arbeit

Im Folgenden soll aus den theoretischen Einführungen der Kapitel 2 und 3 die Kernfragestellung der Arbeit abgeleitet werden (Kapitel 4.1). Dabei wird Bezug auf die aggregierten Prämissen aus technischer (vgl. Kapitel 2.3) und psychologischer Sicht genommen (vgl. Kapitel 3.3). Nach der Eingrenzung des sich daraus ergebenden Untersuchungskonzepts (Kapitel 4.2), wird auf dessen empirische Prüfung über Detailfragestellungen und Studienansätze hingearbeitet (Kapitel 4.3 und 4.4).

### 4.1 Allgemeine Fragestellungen

Die neue Generation von Fahrerassistenzsystemen wird infolge des erweiterten Wirkungsbereichs zu einer Synthese von assistierten und automatisierten Fahrfunktionen führen. Diese bedingt einerseits den Übergang von isolierten hin zu integrierten Systemauslegungen unterschiedlicher Komplexität. Andererseits resultiert daraus eine Bandbreite an Unterstützungsfunktionen, die den Fahrer zunehmend von der Fahraufgabe entbinden, ihn aber gleichzeitig in Übernahmesituationen fordern werden. Essentiell für die Güte der Fahrerreaktion ist dann die Kompatibilität des mentalen Modells des Nutzers mit dem realen Systemverhalten.

Motiviert durch diese Entwicklungen steht im Kern der vorliegenden Arbeit die Frage: Weiß der Fahrer auch zukünftig zu jeder Zeit, wer was, gerade wie tut? Im Fokus steht demnach die nutzerzentrierte Analyse von Reaktionen und Erwartung der Systemnutzer im Kontext von Übergabe- sowie Übernahmesituationen. Schlüsselfaktor ist dabei die Mode Awareness, welche bei fehlender Passung zu Automation Surprises in Form von Mode Errors und Mode Confusion führen kann.

Damit zusammenhängend ergeben sich drei große Themengebiete, die in Form übergreifender Fragen in Tabelle 3 aufgelistet sind.

Tabelle 3: Übergreifende Forschungsfragen

<b>Komplexität der verfügbaren Stufen an Automation</b>
Wie viele und welche Automationsstufen kann der Fahrer kognitiv voneinander differenzieren?
<b>Systemmodi innerhalb des mehrstufigen Automationsansatzes</b>
Welches Bewusstsein hat der Fahrer von aktuellen sowie zukünftigen Zuständen der einzelnen Systemmodi?
<b>Transitionen zwischen den Systemmodi des mehrstufigen Automationsansatzes</b>
Ist sich der Fahrer in Übernahme- und Übergabesituationen stets darüber bewusst, welcher Systemmodus gerade aktiv ist bzw. auf welchen die Transition erfolgte?

Bevor eine Kurzerläuterung zu den Themenblöcken der Tabelle 3 stattfindet, sei darauf hingewiesen, dass der Schwerpunkt dieser Arbeit auf dem Gebiet der Transitionen liegt. Demgemäß geht es primär um die Identifizierung von Übergängen zwischen Fahrer und Automation, die zu negativen Effekten auf der Verhaltens- bzw. Bewertungsebene führen können. Grundlage dafür sind Erkenntnisse aus der Automationsforschung, welche in die Analyse eines mehrstufigen Automationsansatzes mit zugehörigen Systemmodi einfließen (Kapitel 4.2). Sie definieren die spezifischen Fragen der vorliegenden Arbeit (Kapitel 4.3) und verfeinern die grundsätzlichen Fragen aus Tabelle 3.

### **Komplexität der verfügbaren Stufen an Automation**

Diese übergreifende Forschungsfrage aus Tabelle 3 resultiert zum einen aus der Tatsache, dass komplexe Systeme in der Automationsforschung häufig mit einem „Lack of Mode Awareness“ verbunden sind (vgl. Kapitel 3.2.2). Zum anderem wurden bisher zumeist nur Übergangsszenarien zwischen zwei Automatisierungsstufen betrachtet (vgl. Kapitel 3.2). Angesichts der Entwicklungen im Automobilbereich (vgl. Kapitel 2.1) erscheint eine mehrstufige Betrachtung der Thematik Automatisierung im Fahrzeug daher nicht nur sinnvoll, sondern notwendig. Demgemäß stellt sich die Frage, welche Automationsstufen aus Gründen der Übertragbarkeit in die Praxis eingebunden werden sollten. Hierfür bedarf es einer geeigneten Ableitung und Eingrenzung. Diese findet im folgenden Kapitel „Rahmenbedingungen“ unter dem Abschnitt 4.2.1 statt.

Als Hauptannahmen zur Komplexität der verfügbaren Stufen an Automation wird einerseits postuliert, dass der Fahrer die technisch klar voneinander getrennten Automationsgrade mental nicht auf dem gleichen Detaillevel differenzieren kann. Insbesondere höhere Automatisierungsfunktionen mit integrierten Systemauslegungen verschmelzen in ihren wahrnehmbaren Unterschieden (vgl. Kapitel 2.1.6). Gleichfalls ist zu erwarten, dass die Zusammensetzung der Automationsstufen in Abhängigkeit der Art der Einbindung des Fahrers in die Fahraufgabe ein modulierender Faktor für die Bewertung von Übergangssituationen ist. So fällt es dem Fahrer möglicherweise leichter Teilfunktionen abzugeben bzw. zu übernehmen, wenn er nach wie vor Bestandteil des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises ist. Fehlt dem Fahrer mit zunehmendem Automatisierungsgrad das Feedback, erwartet er eventuell ein anderes Systemverhalten, respektive Verknüpfung von Automationsstufen untereinander (vgl. Kapitel 3.2.2).

### **Systemmodi innerhalb des mehrstufigen Automationsansatzes**

Die übergreifende Forschungsfrage aus Tabelle 3 hängt direkt mit den Voraussetzungen für ein angemessenes Systembewusstsein zusammen (vgl. Kapitel 3.2.1). So bedarf es hierbei

eines möglichst vollständigen Modells des Systems bzw. Systemmodus, inklusive dessen Zustände sowie Voraussetzungen für Transitionssituationen. Fehlinterpretationen oder kognitive Fehlannahmen bedingen in diesem Zusammenhang Mode Confusion. Der Nutzer glaubt dabei, auf einer Ebene der Handlungsführung unterstützt zu werden, auf der keine bzw. nur begrenzt Funktionen arbeiten. Ursache hierfür ist häufig eine inkorrekte Beobachtung des Systems oder eine unangemessene Abstraktion dessen Eigenschaften bzw. Verhaltensweisen (vgl. Kapitel 3.2.2). Die Aktivierung kontextbasierter Schemata und erwartungsgeleiteter Aufmerksamkeitsprozesse spielen beim zuletzt genannten Aspekt eine wichtige Rolle (vgl. Kapitel 3.2.3). Mit Bezug zu den Anmerkungen zur Komplexität der verfügbaren Stufen an Automation ist es daher sinnvoll, Systemmodi in der Arbeit zu betrachten, die im Automobilbereich bereits serienmäßig verfügbar sind und darüber hinaus eine logische Erweiterung davon darstellen. So kann der Nutzer auf bekannte Systemmodelle aufsetzen und muss andererseits Neue für relativ komplexe Systemmodi schaffen. Die Ableitung und Eingrenzung derartiger Fahrfunktionen für die vorliegende Arbeit erfolgt im Abschnitt 4.2.2 des nächsten Kapitels.

Als Hauptannahmen für die Systemmodi wird postuliert, dass die Kombination von Einzel-funktionen mit integrierten Auslegungen für den Fahrer mental eine besondere Herausforderung in Transitionssituationen darstellt. Gleiches gilt für funktional aufeinander aufsetzende Systeme. So werden hier zum einen Top-Down-Mechanismen bezüglich des erwarteten Systemverhaltens zum Tragen kommen. Zum anderen muss sich der Fahrer funktional und situativ mit zahlreichen Zuständen der Modi auseinandersetzen. So ist jedes System nur unter ganz bestimmten Voraussetzungen aktivierbar, weist funktionsabhängige Grenzen auf und ist teilweise nicht zu 100 % zuverlässig.

### **Transitionen zwischen den Systemmodi des mehrstufigen Automationsansatzes**

Die übergreifende Forschungsfrage aus Tabelle 3 ergibt sich aus der Tatsache, dass Inkonsistenzen im nutzerseitigen Bewusstsein über den Systemmodus und dessen Verhalten insbesondere in Transitionssituationen zum Phänomen der „Automation Surprises“ führen können. Unangemessene Handlungen (errors of commission) oder ausbleibende Reaktionen (errors of omission) können die Folge sein. Hintergrund ist zumeist eine Verwechslung des Zustandes (Mode Confusion) und damit des einhergehenden Systemverhaltens (vgl. Kapitel 3.2.2). Oft werden in diesen Situationen auch nicht die richtigen Informationen gesucht (Woods et al., 1994). Im Kontext eines mehrstufigen Automationsansatzes besteht die Herausforderung für den Fahrer zusätzlich darin, neben dem Umgang mit der Anzahl an Fahrfunktionen gleichfalls dynamisch wechselnde Automationsgrade zu beherrschen. Der Wechsel selbst ist einerseits durch die transitionsauslösende Bedingung (z.B. System deaktiviert)

tiviert sich aufgrund einer Systemgrenze) definiert. Andererseits hat sich in diesem Zusammenhang in der Automationsforschung aus der Luftfahrt gezeigt, dass spezifische Merkmale der Transition mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für ein „Lack of Mode Awareness“ einhergehen. Auf beide Aspekte wird im folgenden Kapitel unter dem Abschnitt 4.2.3 eingegangen. Im Fokus steht die systematische Ableitung und Übertragung von Transitionssituationen auf den Fahrzeugkontext.

Als Hauptannahmen für Transitionssituationen wird postuliert, dass die Komplexität der verfügbaren Stufen an Automation Einbußen im Modusbewusstsein des Fahrers verursachen kann und damit Parallelen zum Luftfahrtkontext identifizierbar sind. Zudem wird erwartet, dass in Abhängigkeit der Gestaltung der Transition die Auswirkungen auf der Verhaltens- und Bewertungsebene unterschiedlich ausfallen. Weiterhin wird angenommen, dass neben Übergängen mit Deaktivierungen von Funktionen auch in Aktivierungssituationen Mode Confusion auftreten kann. Da das Konstrukt Mode Awareness bislang kaum im Automobilkontext untersucht wurde, setzt diese Arbeit auf ein exploratives Vorgehen auf und versucht die zugrunde liegenden Fragestellungen (Kapitel 4.3) anhand von Fahrverhaltens-, Fahrerzustands- und Befragungsdaten zu beantworten. Ziel ist es, für ausgewählte Automationsstufen mit praxisnahen Systemumsetzungen Gestaltungsempfehlungen für Transitionen zwischen Fahrer und Automation zu geben, um die nutzerseitige Transparenz der Übergänge sowie Systemmodi zu gewährleisten.

## **4.2 Rahmenbedingungen der Arbeit**

Der folgende Abschnitt legt anhand von **vier Kernkriterien** das Untersuchungskonzept der vorliegenden Arbeit fest. Diese orientieren sich primär an derzeitige Entwicklungen im Fahrzeugsektor, um eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse zu gewährleisten und praxisnahe Anwendungsfälle einfließen zu lassen. Daneben erfolgt bei der Ableitung von Prüfscenarien und Prüfmerkmalen für Transitionssituationen ein Transfer aus psychologischen Erkenntnissen zur Mensch-Maschine-Interaktion im Luftfahrtkontext in den Automobilbereich. Zudem grenzen die Rahmenbedingungen die übergreifenden Fragestellungen aus Kapitel 4.1 ein und ermöglichen die Ableitung spezifischer Annahmen (Kapitel 4.3).

### **4.2.1 Mehrstufiger Automationsansatz**

Das erste Kriterium des Untersuchungskonzepts setzt am Übergang von konventionellen Fahrerassistenzsystemen in sogenannte ADAS an (vgl. Kapitel 2.1, 2.2) und fokussiert ebenfalls integrierte Systemauslegungen, bei denen der Fahrzeugführer mit einer Synthese von Assistenz und Automation konfrontiert wird. Es greift folglich den mehrstufigen Grundgedanken der Arbeit auf und betont die zukünftige Bandbreite an Automation im Fahrzeug (vgl.



Kapitel 4.1). Im Fokus stehen Fahrfunktionen, die einen vielschichtigen Automationsansatz von der manuellen bis hin zur hochautomatischen Fahrt aufspannen (vgl. Abbildung 8) und somit einer isolierten „Entweder-oder Betrachtung“ widersprechen.

Betrachtet man diesbezüglich den aktuellen Serienstandard, können neben warnenden und informierenden Systemen Fahrfunktionen identifiziert werden, welche die Längs- und / oder Querverführung des Fahrzeugs übernehmen (vgl. Kapitel 2.1). Unter Einbezug der Fahrzeugführung ohne Unterstützungssysteme sind gemäß Gasser et al. (2012) drei Automationsstufen in der Serienentwicklung voneinander abgrenzbar: **Fahrer selbst**, **Assistiert**, **Teilautomatisiert** (vgl. Kapitel 2.2.2). Daher fließen diese Stufen gleichfalls in die vorliegende Arbeit ein (vgl. Abbildung 21). In Ergänzung hierzu erfolgt die Integration der Stufe „**Hochautomatisiert**“ (vgl. Abbildung 21), welche Fahrfunktionen umfasst, die in Längs- und Querrichtung miteinander verschaltet sind sowie nicht dauerhaft überwacht werden müssen. Obwohl derartige Systeme noch Forschungsstatus besitzen, sind sie als nächster Entwicklungsschritt in Richtung Automation für definierte Anwendungsszenarien logisch ableitbar (vgl. Kapitel 2.2.1). Mit Blick auf die Stufe der Teilautomation ist hierbei besonders interessant, ob der Fahrer zwischen diesen beiden Funktionsausprägung trennen kann. So stellen sie zwar aus Funktionssicht aufeinander aufbauende Systementwicklungen dar (vgl. Kapitel 4.2), für den Fahrer unterscheiden sie sich jedoch nur in seiner Rolle als Überwacher. Unter der Annahme, dass der Fahrer zu Beginn der Systemnutzung auch bei der hochautomatischen Fahrfunktion dieser Rolle in ähnlicher Form für den Vertrauensaufbau nachkommt, ähneln sich beide Level sehr stark. Daher nehmen sie in der vorliegenden Arbeit auch eine zentrale Stellung ein. Nicht intendierte Nebeneffekte in Form eines geringen Systemverständnisses, mangelnder Transparenz der Automationseingriffe oder verwechselter Systemzustände sind bei Übergängen zwischen diesen komplexen Automationsgraden erwartbar (vgl. Kapitel 4.4),



Abbildung 21: Untersuchte, vier Automationsstufen der vorliegenden Arbeit: „Fahrer selbst“, „Assistiert“, „Teilautomatisiert“ und „Hochautomatisiert“

Die „Hochautomation“ definiert gleichzeitig das Ende der betrachteten Automationsstufen dieser Arbeit (vgl. Abbildung 21). Die Gründe dafür liegen vor allem darin, dass auf dem Level „Vollautomatisiert“ der Fahrer „out of the loop“ sein darf und nicht mehr als Rückfall-

ebene fungiert (vgl. Kapitel 3.1.3). Folglich ergeben sich hiermit eher weniger sicherheitsrelevante Fragen zur nutzerzentrierten Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Zudem sind die mit der Automatisierung einhergehenden Folgen (vgl. Kapitel 3.2.4) in der Funktion bereits impliziert und müssen durch sie beherrschbar sein.

Zusammenfassend ist die in dieser Arbeit untersuchte Bandbreite an Automation durch **vier Automatisierungsstufen** gekennzeichnet. Jene bauen im Sinne eines Migrationspfades aufeinander auf und spiegeln die wesentlichsten Entwicklungsmeilensteine im ADAS Bereich wider. Sie werden im folgenden Kapitel 4.2.2 durch konkrete Systemmodi genauer spezifiziert und aufgegliedert.

#### **4.2.2 Systemmodi innerhalb des mehrstufigen Automationsansatzes**

Das zweite Kriterium für das Konzept der vorliegenden Arbeit ergibt sich direkt aus der eben festgelegten Bandbreite an Assistenz und Automation (vgl. Abbildung 21). Es bezieht sich auf die genaue Beschreibung derjenigen Funktionen, die den gewählten Automationsstufen repräsentativ zuordenbar sind. Jene müssen im Sinne von Systemmodi einerseits durch ihr spezifisches Verhalten und andererseits durch ihre Funktionalität ausreichend charakterisiert sein. Diese intermodale Abgrenzung sowie intramodale Spezifikation erleichtert beim weiteren Vorgehen deren technische Umsetzung. Sie ermöglicht zudem eine Vergleichbarkeit der Systemauslegungen in verschiedenen Untersuchungskontexten.

Um eine Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse dieser Arbeit auf den Automobilbereich zu ermöglichen, sollte sich die Ausgestaltung der einzelnen Modi zum einen an derzeitigen Lastenheften für Seriensysteme orientieren. Zum anderen sind Fahrfunktionen, welche noch nicht verfügbar sind, an den aktuellen Forschungsstand im Bereich ADAS anzulehnen. Aus psychologischer Sicht bedarf es darüber hinaus einer Zuordnung der gewählten Systemmodi zu bestehenden Taxonomien der Automatisierung (vgl. Kapitel 3.1.2). Über die hiermit verbundene Definition der Rolle des Fahrers im Mensch-Maschine-System können auf der Basis von existierenden Erkenntnissen aus der Automationsforschung Annahmen über die Auswirkung des Automationsgrads in Transitionssituationen getroffen werden.

In Analogie zum Status quo heutiger Fahrerassistenzsysteme (vgl. Kapitel 2.1.2) werden für die vorliegende Arbeit zunächst das **ACC** als Funktion mit adaptiver Abstands- und Geschwindigkeitsregelung sowie das **LKS** mit aktivem Eingriff in die Spurführung ausgewählt. Beide Systeme können in Abhängigkeit ihrer funktionsspezifischen Auslegung und Gestaltung als hinreichende Vertreter der übergeordneten Automationsebenen in Abbildung 21 angesehen werden. Gleichzeitig repräsentieren sie in isolierter bzw. kombinier-

ter Form den derzeitigen Serien- und Forschungsstand im Bereich von Quer- sowie Längsführungssystemen (vgl. Kapitel 2.1.2, 2.1.3). Im Sinne ihrer Basisfunktionalität entsprechen ACC und LKS dabei dem assistierten Level der Abbildung 21. In der vorliegenden Arbeit wird allerdings nur das ACC isoliert auf dieser Stufe betrachtet. Die laterale Unterstützung geht als funktionale Ergänzung zur Längsführungsassistenz in das Untersuchungskonzept ein (vgl. Abbildung 22). Das somit entstandene ADAS mit integrierter Längs- und Querführung repräsentiert annähernd die Stufe des teilautomatischen Fahrens (Gasser et al., 2012). Sie ermöglicht dem Fahrer eine Fahrt mit ACC in Kombination mit einer assistierten Spurhaltung, welche durch die Initiierung einer Gegenlenkkraft bei unbeabsichtigtem Annähern an die Fahrbahnränder gekennzeichnet ist. Jener Modus ist mit aktuellen Seriensystemen herstellbar und tritt beispielsweise auf einer Autobahnfahrt mit aktiviertem ACC und Heading Control in ähnlicher Form auf. Mit Bezug zu bereits auf dem Markt befindlichen Systemen (z.B. Stauassistent von BMW) wird diese integrierte Fahrfunktion in der vorliegenden Dissertation als Modus „**Assistent**“ bezeichnet (vgl. Abbildung 22). Da der Fahrer hier noch überwachen muss, wird trotz Zuordnung zur Stufe der Teilautomation, nicht die Automation, sondern der Begriff der Unterstützung im Namen verankert. Für die Umsetzung in der hochautomatischen Fahrt findet hingegen eine Kombination von ACC mit einer fahrspurzentrierten Spurhaltung statt (vgl. Tabelle 4). Letztere ermöglicht dem Fahrer infolge der Kontinuität sowie Stärke des Eingriffs die dauerhafte Wegnahme der Hände vom Lenkrad. Eine derartige Systemauslegung hat aktuell noch Forschungsstatus, ist jedoch für den Kontext einer monotonen Autobahnfahrt eine durchaus denkbare Entwicklungsrichtung (vgl. Kapitel 2.3.2). Da die systemseitige Fahrzeugführung als Vorstufe zu einem Autopiloten angesehen werden kann, erhält der Modus in dieser Arbeit den Namen „**Pilot**“ (vgl. Abbildung 22).

Mit Bezug zur übergeordneten Ebene des mehrstufigen Automationsansatzes aus Abbildung 21, stellt die Abbildung 22 zusammenfassend alle erläuterten **Systemmodi der vorliegenden Arbeit**, inklusive der Fahrt ohne jegliche Unterstützung dar.

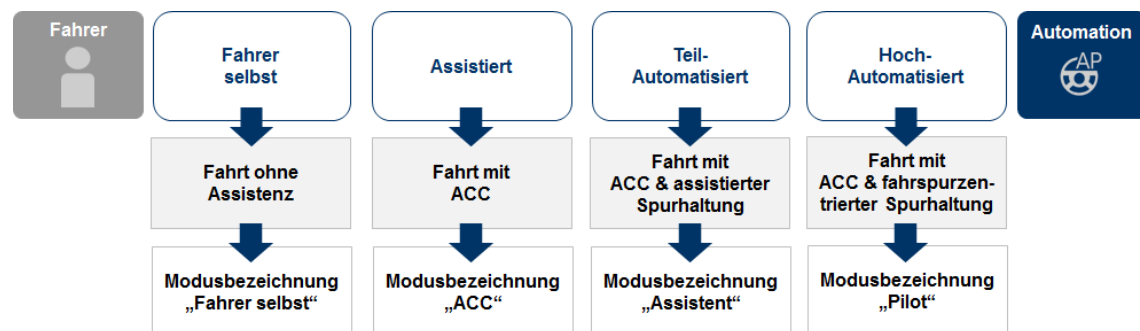


Abbildung 22: Integrierte Systemmodi innerhalb des mehrstufigen Automationsansatzes, inklusive Modusbezeichnung in der vorliegenden Arbeit

Die spezifische Auslegung und Implementierung der Systemmodi aus Abbildung 22 richtete sich nach der gewählten Testmethodik bzw. Versuchsumgebung dieser Arbeit. Deren konkrete Erläuterung erfolgt daher erst innerhalb der Methodenteile der durchgeführten Studien (vgl. Kapitel 5, 6). Einen grundsätzlichen Überblick gibt an dieser Stelle die Tabelle 4. Sie enthält je Systemmodus eine Kurzbeschreibung der entsprechenden Funktion. Zudem enthält sie die im Weiteren verwendeten Begriffsvereinfachungen für die betrachteten Modi. Diese finden sich insbesondere in den Ergebnisteilen der vorliegenden Arbeit wieder.

Tabelle 4: Kurzbeschreibung und Namenskürzel der integrierten Systemmodi

Systemmodus	Begriffliche Vereinfachung	Funktionskurzbeschreibung
Fahrt ohne Assistenz	„FS“ (Fahrer selbst)	Es sind keine Systeme aktiv.
Fahrt mit Adaptive Cruise Control	„ACC“	Das System hält eine vom Fahrer gesetzte Geschwindigkeit ein und passt diese automatisch an einen vorgeählten Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug an.
Fahrt mit kombinierter Quer- und Längsführung, Spurhaltung unterstützt	„Assistent“	Das System hält eine vom Fahrer gesetzte Geschwindigkeit ein und passt diese automatisch an einen vorgeählten Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug an. Durch korrigierende Lenkeingriffe nahe den Fahrbahn-rändern wird der Fahrer bei Spurhaltung unterstützt. Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen.
Fahrt mit kombinierter Quer- und Längsführung, Spurhaltung übernommen	„Pilot“	Das System hält eine vom Fahrer gesetzte Geschwindigkeit ein und passt diese automatisch an einen vorgeählten Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug an. Durch eine auf die Fahrspurmitte zentrierte Spurführung wird das Fahrzeug in der Spur gehalten. Der Fahrer kann seine Aufmerksamkeit temporär vom Fahrgeschehen abwenden. Eine dauerhafte Überwachung ist nicht nötig.

Betrachtet man die gewählten Systemmodi aus psychologischer Sicht, lassen sich die Fahrfunktionen mit Hilfe der Taxonomie der Aufgabenverteilung nach Parasuraman et al. (2000, vgl. Abbildung 14, Tabelle 1) annähernd den in Abbildung 23 dargestellten Informationsverarbeitungsphasen zuordnen. Diesbezüglich wird deutlich, dass die betrachteten Systemmodi den Fahrer unterschiedlich stark von der Fahraufgabe entbinden. Alle sind zudem relativ hoch gemäß des Automationsgrads von Sheridan und Verplank (1978) einzuordnen. Die unterschiedlich starke Entbindung des Fahrers aus dem Kontroll-Loop bei gleichzeitig zunehmender Komplexität der vier automatisierten Fahrfunktionen schafft entsprechend den Erkenntnissen der Automationsforschung (vgl. Kapitel 3) eine wichtige Grundlage, um differenzierte Aussagen zur Auswirkung von Automation und Transition auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion zu treffen. Effekte auf das Modusbewusstsein sowie das mental repräsentierte Systemmodell sind dabei besonders in Übergabe- und Übernahme-situationen zu erwarten (vgl. Kapitel 4.2.4).

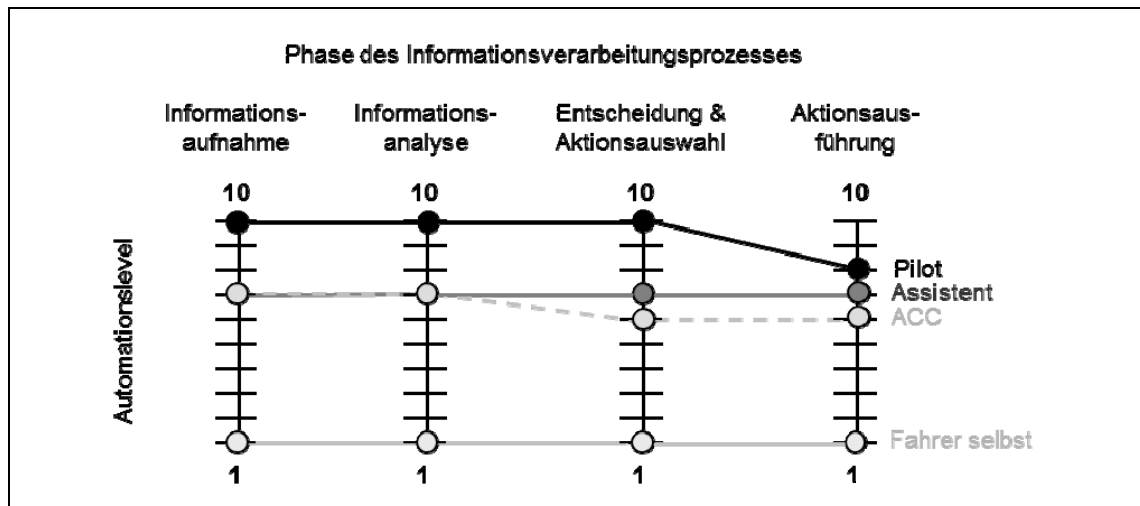


Abbildung 23: Zuordnung der ausgewählten Systemmodi dieser Arbeit zur Taxonomie der Aufgabenverteilung nach Parasuraman et al. (2000)

#### 4.2.3 Anwendungskontext für die Systemmodi

Das dritte Kriterium für das Untersuchungskonzept betrifft den Anwendungskontext für die vier Systemmodi. Diesbezüglich wird über alle Fahrfunktionen hinweg ein Szenario angestrebt, dass einerseits dem Nutzungsbereich derzeitiger Seriensysteme und andererseits Rahmenbedingungen für das automatische Fahren erfüllt (vgl. Kapitel 2.3.2). Aus diesen Gründen adressiert die Arbeit nur **Fahrten auf der Autobahn**, die im normalen Verkehrsfluss stattfinden und zudem einfache, monotone Strecken betreffen. Im Sinne der ADAS Migrationsstrategie steht folglich ein erster möglicher Einsatzbereich für Fahrfunktionen mit höherem Automatisierungsgrad (vgl. Kapitel 2.3.2) im Vordergrund. Die Arbeit versucht diesbezüglich auf explorativer Basis Erkenntnisse zur nutzergerechten Gestaltung von Übergabe- und Übernahme-situationen zu liefern. Wesentlich ist hierbei, dass sich die betrachteten Transitionen nicht nur zwischen Fahrer und einer Automationsstufe ereignen, sondern vielfältige Übergänge zwischen verschiedenen Systemmodi erfolgen (vgl. Kapitel 4.4). Voraussetzung dafür ist die grundlegende Annahme, dass zukünftig mehrere Fahrfunktionen gleichzeitig im Fahrzeug verfügbar sind. Je nach Erfüllung systemseitiger Voraussetzung kann sich der Fahrer also in einer Bandbreite an Automation bewegen. Welche Transitionen sich dabei aus technischer Sicht mit Bezug zu den vier Systemmodi ergeben können und wie diese unter psychologischen Gesichtspunkten bezüglich ihrer Relevanz für den Schwerpunkt dieser Arbeit zu gewichten sind, erläutert das folgende Kapitel 4.2.4.

#### 4.2.4 Transitionssituationen zwischen den Systemmodi

Das vierte Kriterium für das Untersuchungskonzept dieser Arbeit resultiert hauptsächlich aus dem Trade-off zwischen dem Zuwachs an gleichzeitig verfügbaren Fahrfunktionen im Fahrzeug mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad und der Anforderung, dass der Fahrer

auch im Rahmen der hochautomatischen Fahrt in der Lage sein muss, die Fahraufgabe wieder zu übernehmen (vgl. Kapitel 2.3.3). Folglich kristallisieren sich neben generellen Automationseffekten Übergabe- bzw. Übernahme-situationen zwischen Fahrer und Fahrzeug als wichtiger Forschungsschwerpunkt heraus. In Ergänzung zu eher zweidimensionalen Betrachtungen, die primär Übergänge von der Automation zurück zum Fahrer bewerten und sich vorrangig mit Übernahmezeiten beschäftigen (Übernahmephase), fokussiert die vorliegende Arbeit zwei weitere Aspekte:

- (1) Übergänge vom Fahrer zur Automation (Übergabephase)
- (2) Übergänge zwischen Automationsstufen (Zwischenstufen der Automation)

Somit sind neben **direkten (De-)aktivierungen** (von System A zu System B) ebenso **Zwischenstufen** (von System A zu System B über System C) zu bedenken. Damit einhergehend, ergeben sich unterschiedlich „weite“ Transitionen, die bestimmen, wie viel Kontrolle an das Fahrzeug abgegeben bzw. wieder übernommen werden muss (Di Nocera, Lorenz & Parasuraman, 2005). Entscheidend ist hierfür der „Startmodus“, d.h. der momentane Automatisierungsgrad und der „Endmodus“, d.h. die gewünschte Automatisierungsstufe. Daraus ergibt sich gleichfalls die **Richtung der Transition**, welche eine Aktivierung oder Deaktivierung eines mehr oder weniger stark automatisierten Systems mit sich bringt.

Auf Basis dieser Prämissen ergibt sich theoretisch eine Bandbreite an Automation, welche durch zahlreiche Transitionsoptionen sowie Zustandsveränderungen zwischen und innerhalb einzelner Automatisierungsstufen charakterisiert ist. Abbildung 24 visualisiert ein dafür potentiell denkbare **Zustandsdiagramm**, welches je nach Funktionsvielfalt und -umfang durchaus noch komplexer ausfallen kann. Die Bedeutung der nummerierten Pfeile ist in der anschließenden Tabelle 5 näher erläutert.

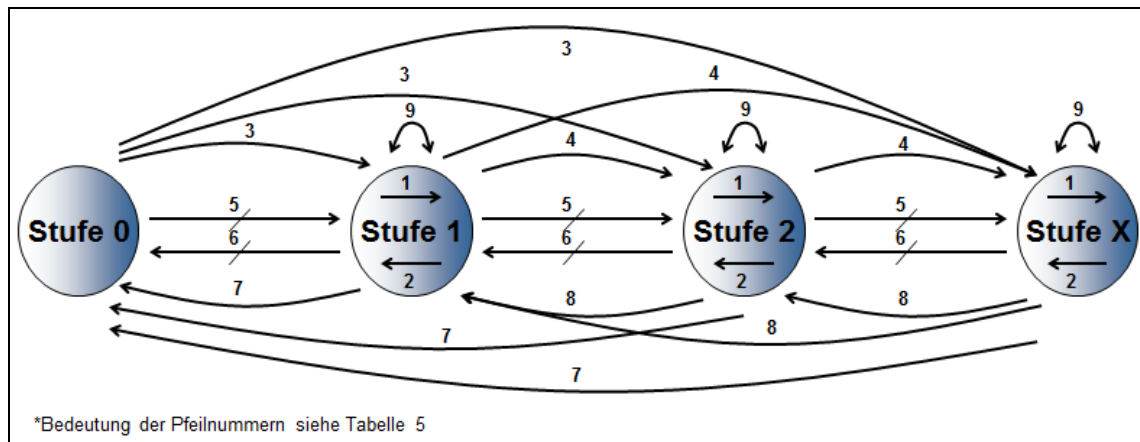


Abbildung 24: Zustandsdiagramm mit potentiell denkbaren Transitionen und Zustandsveränderungen zwischen einzelnen Stufen der Automation

Tabelle 5: Bedeutung der Pfeile des Zustandsdiagramms in Abbildung 24

Zustandsveränderungen innerhalb der Automatisierungsstufe	
1	System wechselt vom Zustand „nicht bereit“ auf „bereit“ oder „aktiv“
2	System wechselt vom Zustand „aktiv“ oder „bereit“ auf „nicht bereit“
9	System wechselt vom Zustand „aktiv“ auf den Zustand „passiv“
Transitionen in Richtung der Automation	
3	(Direkte) Aktivierung eines Systems mit Automatisierungsgrad X im Zustand „bereit“
4	(Indirekte) Aktivierung eines Systems mit Automatisierungsgrad X im Zustand „bereit“ aus einer geringeren Automatisierungsstufe (indirekte Transition)
5	Fehlgeschlagene Aktivierung eines Systems, da System im Zustand „nicht bereit“
Transitionen in Richtung des Fahrers	
6	Fehlgeschlagene Deaktivierung eines Systems, da System nicht im Zustand „aktiv“
7	Vollständige (direkte) Deaktivierung eines aktiven Systems mit Automatisierungsgrad X und Übergang auf die Automatisierungsstufe 0
8	Teilweise (indirekte) Deaktivierung eines aktiven Systems mit Automatisierungsgrad X und Übergang auf eine geringere Automatisierungsstufe

Die Pfeile in Abbildung 24 symbolisieren gemäß Tabelle 5 potentielle Veränderungen innerhalb des mehrstufigen Automationsansatzes, die sich sowohl im **Normalbetrieb** eines Systems, aber auch an den **Systemgrenzen** oder im **Fehlerfall** ergeben können (Betriebsmodus). Die Erreichung von Systemgrenzen ist dabei aus technischer Sicht stets prädzierbar. In der Fehlersituation differenziert man hingegen tolerierbare und nicht tolerierbare Fehler. Da im ersten Fall die Güte des Systems nur temporär betroffen ist, erfolgt hier im Unterschied zum zweiten kein Systemabwurf. Bei akuten Fehlern können zudem notwendige Systemübergängen oder Information an den Fahrer ausbleiben.

Die Voraussetzung für Transitionen mit einhergehendem Wechsel des Automatisierungsgrades ist stets eine Veränderung innerhalb des Systemzustandes (Harel, 1987). Diesbezüglich können im Allgemeinen **drei Zustände** unterschieden werden (vgl. Tabelle 5). Sie hängen mit der Systemverfügbarkeit zusammen und sind demnach mit den Voraussetzungen für eine Systemaktivierung verknüpft (z.B. Fahrbahnmarkierung detektiert, Geschwindigkeit >65 km/h).

- (1) System nicht bereit
- (2) System bereit
- (3) System aktiv

Neben den genannten Unterscheidungsmerkmalen von Transitionen ist gleichfalls die Art der transitionsauslösenden Eingangsgröße entscheidend (Ashby, 1956). Im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion sind dies meistens der Fahrer oder das System (vgl. Kapitel 3.2.2). In

seltenen Fällen können beide gleichzeitig beteiligt sein (Ashby, 1956). Auf globaler Ebene werden die meisten Transitionen hierbei nach dem Schema in Tabelle 6 klassifiziert (Martens et al., 2007). So kann sowohl der Fahrer als auch die Automation eine Funktion aktivieren bzw. deaktivieren. Die Transition ist demnach **fahrerinitiiert** oder **systeminitiiert**. Vergleichbare Klassifizierungen sind bei Levitan et al. (1998) sowie bei Tsao, Hall und Shladover (1993) dokumentiert. Einige dieser wurden zudem in empirischen Studien zu „Automated Highway Systems“ evaluiert (vgl. Buck & Yenamendra, 1997; De Vos & Hoekstra, 1997; Bloomfield et al., 1998). Teilweise findet sich ebenfalls eine erweiterte Einteilung der Transitionen nach dem Kriterium der Abbrechbarkeit eines ausgelösten Übergangs (Levitan et al., 1998), die jedoch hier nicht betrachtet wird.

Tabelle 6: Globale Klassifikation von Transitionen (Martens et al., 2007; modifiziert)

	Wer hat die Fahrzeugkontrolle?	Wer erhält die Fahrzeugkontrolle?	Wer löst die Transition aus?
<b>Aktivierung des Systems</b>	Fahrer	Automation	Fahrer oder Automation
<b>Deaktivierung des Systems</b>	Automation	Fahrer	Fahrer oder Automation

### Ableitung der Transitionssituationen der Arbeit

Auf Basis dieser Erläuterungen und der Annahmen zu Transitionssituationen innerhalb eines mehrstufigen Automationsansatzes findet im Folgenden eine systematische Ableitung der für die vorliegende Arbeit relevanten Übergangsszenarien statt. Der Fokus liegt dabei auf der Identifizierung und Prüfung von Übergabe- bzw. Übernahme-situationen, die eine hohe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Mode Confusion oder Mode Errors besitzen bzw. zu einem geminderten Situationsbewusstsein führen können (vgl. Kapitel 3.2.1, 3.2.2). Hierfür sind zunächst aus der Literatur bekannte Vorbedingungen für jene Phänomene auf reale Transitionen im Fahrkontext zu übertragen. Darüber hinaus gilt es, diese für den in Abbildung 22 betrachteten Automationsansatz der Arbeit zu falsifizieren oder zu verifizieren. Daher gliedert sich das folgende Vorgehen in **drei Schritte**:

- (1) Strukturierung von Transitionen aus technischer Sicht
- (2) Identifizierung von (psychologische) Merkmalskategorien, welche häufiger mit Mode Confusion oder Mode Errors in Verbindung stehen
- (3) Transfer der technischen und psychologischen Gesichtspunkte auf empirisch überprüfbare Anwendungsfälle für Übergangsszenarien im Fahrkontext

Demgemäß wird im **ersten Schritt** geprüft, unter welchen Gegebenheiten sich aus technischer Sicht Übergänge zwischen dem Fahrer und dem System ereignen können. Hier-



für findet der Bezug zu folgenden, vorangegangenen Erläuterungen statt: Richtung der Transition, Art der transitionsauslösenden Eingangsgröße, Betriebsmodus des Systems. Auf dieser Grundlage entsteht das Schema aus Abbildung 25, welches eine **aggregierte, allgemeine Strukturierungsbasis** für Übergänge aus technischer Sicht darstellt.

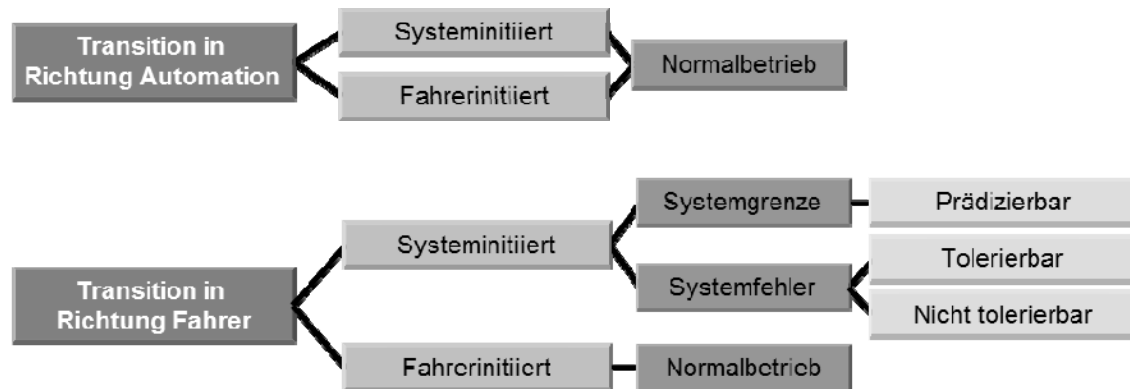


Abbildung 25: Strukturierung von Transitionen aus technischer Sicht

Ein Beispiel für die Abbildung 25 betrifft die Einschaltung eines Assistenzsystems, welches sich im „Normalbetrieb“ befindet und daher für eine Aktivierung bereit ist. Erreicht die Funktion hingegen eine präzifizierbare Grenzsituation (z.B. kleiner Kurvenradius), würde sie sich systeminitiiert abschalten. Gleiches gilt für Systemfehler (z.B. Sensordefekt), die im Unterschied zur aktiven Ausschaltung durch den Fahrer von der Funktion ausgelöst werden.

Für die einzelnen Verzweigungen in Abbildung 25 lassen sich auf der Grundlage von spezifischen Funktionsbeschreibungen (z.B. Lastenheft) also konkrete Transitionsszenarien zuordnen. Für diese Arbeit stellt sich demgemäß die Frage, wie die empirisch zu untersuchenden Transitionen charakterisiert sein sollten. Jenem Aspekt widmet sich der nächste Schritt.

Im **zweiten Schritt** findet eine Eingrenzung der aus psychologischer Perspektive relevanten Übergabe- und Übernahme-situationen statt. Dies erfolgt über die Identifizierung **übergeordneter Merkmalskategorien**, welche nach bisherigen Ergebnissen aus der Automationsforschung häufiger mit Mode Confusion oder Mode Errors in Verbindung stehen. Ausgangspunkt sind hierbei vor allem die Arbeiten von Sarter und Woods (1995), Billings (1997), Leveson et al. (1997) sowie Endsley und Garland (2000). Jene weisen zumeist in Form von Taxonomien auf allgemeine Vorbedingungen oder Kennzeichen von Transitionen hin, welche aus Human Factors Sicht als kritisch bezüglich des Erhalts von Mode oder Situation Awareness angesehen werden können (vgl. auch Kapitel 3.2). Demgemäß gibt Tabelle 7 einen zusammenfassenden Überblick über diejenigen Merkmalskategorien, welche prinzipiell für eine differenzierte Untersuchung der Thematik „Automation und Transition“ zu betrachten

sind. Die Tabelle differenziert dabei zwischen zwei Arten von Merkmalskategorien: (1) Merkmal setzt an der Zustandsveränderung innerhalb des Modus an, (2) Merkmal setzt an der Zustandsveränderung zwischen verschiedenen Modi an.

Tabelle 7: Merkmalskategorien mit erhöhter Wahrscheinlichkeit für Mode Confusion oder Mode Errors, inklusive der Situation Awareness Level nach Endsley (1995a)

	Nr.	Merkmalskategorie	Beschreibung der Merkmalskategorie	SA-Level (Endsley, 1995b)
Veränderung innerhalb des Modus	1	Inkonsistentes Systemverhalten	Das System verhält sich in einer für den Nutzer ähnlichen Situation anders als zuvor.	Level 2, 3
	2	Unbeabsichtigte Nebeneffekte	Merkmal tritt auf, wenn eine beabsichtigte Handlung des Operators einen Effekt hat, der nicht vom Nutzer antizipiert wurde (z.B. unerwartete Modusveränderungen oder Wechsel im Systemstatus).	Level 3
	3	Interpretationsfehler der Schnittstelle	Das System interpretiert eine nutzerseitige Eingabe anders als vom Nutzer beabsichtigt oder macht den Output vom aktuellen Systemmodus bzw. weiterer Eingaben abhängig.	Level 1, 2
	4	Inadäquates Feedback an den Operator	Der Operator erhält ein unangemessenes Feedback über den aktuellen Systemstatus.	Level 1
	5	Ignorierung von Kommandos des Operators	Das System ignoriert Kommandos des Operators, da sie für den aktuellen Systemmodus bedeutungslos sind.	Level 2
	6	Verweigerung von Kommandos des Operators	Das System verweigert Kommandos des Operators, da sie einen kritischen Systemzustand bedingen würden.	Level 2
Veränderung zwischen Modi	7	Indirekte (implizite) Transitionen / versteckte Modi	Transitionen, die ohne expliziten Input vom Operator stattfinden und / oder Zwischenlevel aufweisen.	Level 1, 2
	8	Art der Kontrollverschiebung	Das Gesamtsystem ist durch komplexe und vielfältige Verknüpfungen zwischen den Modi gekennzeichnet.	Level 1, 2
	9	Input / Output Relation (Ähnlichkeit) zwischen Systemmodi	Einander funktional ähnliche Systemmodi reagieren auf die spezifische Eingaben des Nutzers (Input) zunächst mit einem gleichen Systemverhalten (Output)	Level 2
	10	Ungewöhnliche und / oder zeitkritische Transition	Transitionen in Situationen, die selten auftreten und / oder schwer vorhergesehen werden können.	Level 1, 2

Neben der Auflistung und Beschreibung der jeweiligen Kategorien erfolgt in Tabelle 7 zudem eine Zuordnung der Merkmale zu den drei Teilebenen von Situationsbewusstsein nach Endsley (1995b, vgl. Abbildung 16). Hierbei zeigt sich, dass Mode bzw. Situation Awareness bezogene Problematiken vorwiegend auf der Wahrnehmungsebene (Level 1) und / oder der

Verstehensebene (Level 2) angesiedelt sind (vgl. Kapitel 3.2.1). Folglich betreffen sie zum einen die Qualität und Quantität der aufgenommenen Informationen, zum anderen die Angemessenheit des aufgebauten, mentalen Nutzermodells (vgl. Kapitel 3.2.3). Diese Aspekte decken sich mit den Forschungsschwerpunkten der vorliegenden Arbeit.

Betrachtet man die Merkmalskategorien in Tabelle 7 wird weiterhin deutlich, dass diese primär durch die Mensch-Maschine-Interaktion im Luftfahrtkontext geprägt sind. Deren Übertragbarkeit auf den Automobilbereich ist, wenn überhaupt, nur in sehr abstrahierter Form möglich. Folglich gilt es, ausschließlich die Kategorien zu fokussieren, welche Potential für eine Anwendung und Überprüfung im Fahrkontext besitzen. Hierfür bedarf es einem Abgleich dieser Merkmale mit der in Abbildung 25 erstellten, technischen Strukturierungsbasis für Transitionen. Demgemäß bezieht sich der **dritte Schritt** der Ableitung der Transitionssituationen dieser Arbeit darauf, die technischen und psychologischen Gesichtspunkte einander gegenüberzustellen. Das Ziel ist hierbei, repräsentative Übergangsszenarien zwischen den definierten Systemmodi zu identifizieren (vgl. Abbildung 22), welche einerseits eine Schnittmenge beider Aspekte darstellen. Andererseits müssen sie mit Bezug zur jeweiligen Fahrfunktion in realistische Use Cases integrierbar sein, deren Nachbildung in geeigneten Testumgebungen möglich ist. Im Ergebnis dieses Abgleichprozesses ergibt sich das in Abbildung 26 dargestellte Schema. Es erweitert die technische Strukturierungsbasis aus Abbildung 25 um diejenigen Merkmale von Transitionen, die in der vorliegenden Arbeit näher betrachtet werden sollen. Deren Auswahl aus Tabelle 7 wird im Anschluss der Grafik begründet. Gleichfalls hebt die Abbildung 26 diejenigen Übergangssituationen hervor, welche in der Arbeit als Untersuchungsgrundlage dienen (dunkelgraue Markierung). Die hellgrau schraffierten Flächen verweisen dagegen auf ausgeklammerte Fälle hin. Auch diese Fallauswahl wird nachfolgend erläutert.

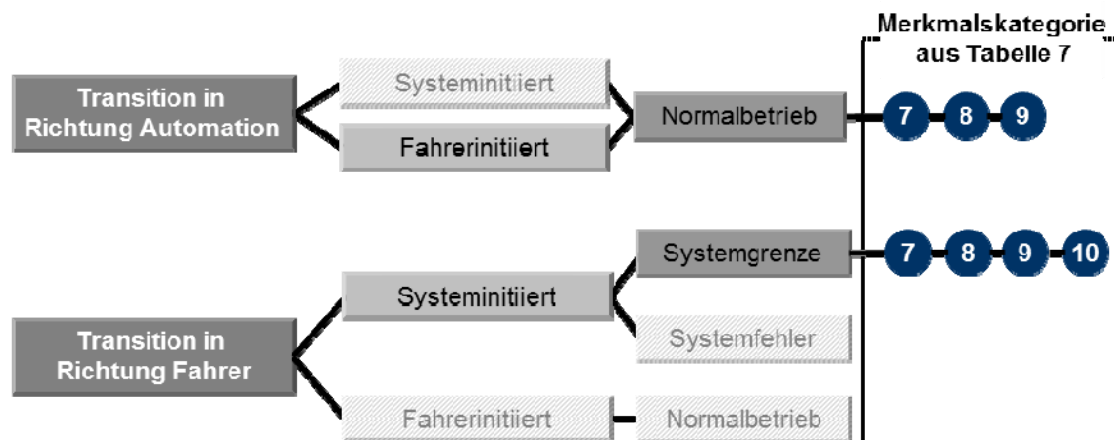


Abbildung 26: Aggregation der Strukturierung von Transitionen aus technischer (vgl. Abbildung 25) und psychologischer Sicht (vgl. Tabelle 7)

Aus Abbildung 26 ist erkennbar, dass in der vorliegenden Arbeit die **Merkmalskategorien mit den Nummerierungen 1 bis 6** (vgl. Tabelle 7) nicht berücksichtigt werden. Die Gründe hierfür liegen vor allem darin, dass diese primär an der Zustandsveränderung innerhalb des Systemmodus ansetzen. Sie führen daher nicht unbedingt zu einer Transition. Zudem setzt das Kriterium mit der Nummer 2 voraus, dass falsche Annahmen beim Nutzer bezüglich des aktuellen Systemzustands vorliegen müssen, um Mode Confusion bzw. Mode Errors zu verursachen. Dies kann jedoch im experimentellen Setting nicht manipuliert bzw. vorausgesetzt werden. Des Weiteren ist die Selektion der Merkmalskategorien dadurch bedingt, dass ignorierte bzw. verweigte Kommandos des Operators (Nr. 5, 6 in Tabelle 7) für den Fahrkontext nicht relevant sind. Die Ignorierung von Nutzereingaben (Merkmalskategorie Nr. 5 in Tabelle 7) könnte sich höchstens auf die Notwendigkeit der Erfüllung von Vorbedingungen für eine Systemaktivierung beziehen. Da bei aktuellen Seriensystemen die Verfügbarkeit von Assistenzfunktionen stets angezeigt wird, muss der Fahrer nicht im Einzelfall prüfen, ob alle Voraussetzungen für das jeweilige System erfüllt sind. Bezüglich der Verweigerung von Kommandos (Merkmalskategorie Nr. 6 in Tabelle 7) ist anzumerken, dass eine derartige Umsetzung im Fahrzeug nicht zulässig ist. Eine analoge Argumentation gilt für die Merkmalskategorie mit der Nummer 3 der Tabelle 7. So gibt es im Gegensatz zur Luftfahrt bei der fahrerseitig initiierten Systemaus- bzw. -einschaltung über eine definierte Schnittstelle keinen Interpretationsspielraum seitens der Assistenzfunktion. In Ergänzung dazu wird in der vorliegenden Arbeit angestrebt, dem Nutzer ein möglichst adäquates Feedback über den aktuellen Systemzustand zu geben (vgl. Merkmal Nr. 4 in Tabelle 7). Es geht somit eher darum, herauszufinden, ob eine Transition zwischen spezifischen Systemmodi trotz angemessener Zustandsanzeige ein „Lack of Mode Awareness“ verursachen kann. Daher steht die Analyse von Mode Confusion Phänomenen im Vordergrund, die durch die Charakteristika der Transitionen selbst und nicht durch intransparente Veränderungen im Modus bedingt sind. Der zuletzt genannte Grund führt deshalb ebenso zum Ausschluss des Merkmals mit der Nummer 1 (vgl. Tabelle 7).

Die **Merkmale mit der Nummerierung 7 bis 9** der Abbildung 26 werden hingegen in der vorliegenden Arbeit betrachtet und dienen als Kernkriterien des Untersuchungsansatzes. Dabei ist anzumerken, dass das **Merkmal mit der Nummer 10** zwar ebenso einfließt (vgl. Abbildung 26), jedoch nur als Charakteristik der transitionsauslösenden Situation Verwendung findet. Damit verbunden wird ein Use Case betrachtet, in dem der Nutzer mit zeitkritischen und unerwarteten Übergängen konfrontiert wird. Rahmenbedingung dafür bildet die Erreichung einer Systemgrenzsituation, welche zu einer vollständigen Kontrollabgabe an den Fahrer führt (vgl. Abbildung 27). Daraus resultiert, dass das Merkmal mit dem Merkmal „Grad der Kontrollverschiebung“ (Nummer 8 in Tabelle 7) sinnvoll kombinierbar ist. Es geht

daher nicht als Kernkriterium der Arbeit ein, wird jedoch begleitend analysiert. In Ergänzung zu diesen (psychologischen) Merkmalskategorien erfolgt zusätzlich die Aufnahme des (technischen) Unterscheidungskriteriums **Richtung der Transition** (vgl. Abbildung 26). Dies ist in der Annahme begründet, dass sich Deaktivierungs- und Aktivierungsphasen unterschiedlich auf der Verhaltens- sowie Bewertungsebene innerhalb eines mehrstufigen Automationsansatzes auswirken könnten (vgl. Kapitel 4.1). Zudem ermöglicht das Merkmal die Analyse von Automation Surprises bei Transitionen in Richtung Automation. Jene wurden bislang kaum betrachtet (vgl. Kapitel 3.2.5).

Der Abgleichprozess zwischen technischen und psychologischen Gesichtspunkten führt somit zu der in Tabelle 8 zusammengefassten Auswahl an betrachteten Merkmalskategorien. Sie dienen in der vorliegenden Arbeit als **Kernmerkmale der Transitionen** zwischen den vier Systemmodi des definierten Automationsansatzes.

Tabelle 8: Ausgewählte Merkmale von Transitionen für die vorliegende Arbeit

Merkmale der Transition	Kurzbeschreibung
<b>Grad der Kontrollverschiebung</b>	Das Merkmal betrifft die Weite der Transition und damit das Ausmaß an verfügbarem Automationsgrad.
<b>Indirekte Transition</b>	Das Merkmal betrifft Übergänge auf Zwischenstufen der Bandbreite an Automation und somit partielle Kontrollverschiebungen auf Teilfunktionen.
<b>Ähnlichkeit der Systemmodi</b>	Das Merkmal betrifft Übergangssituationen zwischen funktional einander ähnlichen Systemen im mehrstufigen Automationsansatz.
<b>Richtung der Transition</b>	Das Merkmal betrifft Übergaben der Kontrolle an das System (Aktivierungsphasen) und Übernahmen der Kontrolle durch den Fahrer (Deaktivierungsphasen).

Aus Abbildung 26 geht darüber hinaus hervor, dass Situationen, in denen die Automation eigenständig einen Systemmodus aktiviert, in der vorliegenden Arbeit ausgeklammert werden. Fokus liegt somit auf Szenarien, die mit einer bewussten Einschaltung durch den Fahrer verbunden sind. Weiterhin bleiben Situationen unberücksichtigt, in denen der Fahrer ein System im Normalbetrieb ausschaltet (vgl. Abbildung 26). In diesem Fall ist zu erwarten, dass keine Mode Awareness relevanten Phänomene auftreten. Ferner werden nur Systemgrenzsituationen betrachtet (vgl. Abbildung 26), da sie versuchstechnisch leichter umsetzbar sind und zudem häufiger auftreten als Systemfehler.

Überträgt man nun die untersuchungsrelevanten Transitionsmerkmale aus Tabelle 8 auf **realitätsnahe Anwendungsfälle für den Fahrkontext** und berücksichtigt die ausgewählten Systemmodi der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 4.2.2), ergibt sich die Unterteilung der

Abbildung 27. Bei der konkreten Ausgestaltung der Übergangsszenarien in den empirischen Untersuchungen (vgl. Kapitel 5.3, 6.3) wird sich die vorliegende Arbeit an funktionalen Anforderungsspezifikationen orientieren, die im Normalbetrieb und an Systemgrenzen das Verhalten der integrierten Fahrfunktionen definieren. So ist deren Verfügbarkeit an Voraussetzungen in der Umwelt oder im Fahrzeug gebunden (z.B. Streckengeometrie, Fahrbahnmarkierungen) und es ergeben sich Grenzwerte im Beschleunigungs- oder Verzögerungsverhalten.

	Normalbetrieb	Systemgrenze
<b>Grad der Kontrollverschiebung</b>	Der Fahrer aktiviert die zunehmend höher automatisierten Systemmodi „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ aus der Stufe „Fahrer selbst“.	Der Systemmodus „Pilot“, „Assistent“ und „ACC“ werden vollständig deaktiviert, da die systemseitige Regelung aufgrund einer Systemgrenze nicht mehr möglich ist. Als Sonderfall gehen hier zeitkritische und vom Nutzer unerwartete Fahrsituationen in die Betrachtung ein.
<b>Indirekte Transition</b>	Der Fahrer aktiviert den verfügbaren Systemmodus „Assistent“ oder „Pilot“ indirekt über die Zwischenstufe „ACC“.	Der Systemmodus „Assistent“ oder „Pilot“ geht aufgrund der Erreichung einer Systemgrenze auf den Zwischenmodus „ACC“ zurück.
<b>Ähnlichkeit der Systemmodi</b>	Der Fahrer aktiviert den verfügbaren Modus „Pilot“ aus dem aktuell aktiven Modus „Assistent“.	Das System schaltet aus dem Modus „Pilot“ in den verfügbaren Modus „Assistent“ zurück.
<b>Richtung der Transition</b>	Es findet eine Aktivierung eines Systemmodus durch den Fahrer statt.	Es findet eine Deaktivierung eines Systemmodus durch das System statt.

Abbildung 27: Transitionsrelevante Anwendungsfälle der vorliegenden Arbeit mit Bezug zum Fahrkontext und den ausgewählten Systemmodi

#### 4.2.5 Fazit

Aus dem Kapitel 4.2 geht zusammenfassend hervor, dass die Arbeit einen **vierstufigen Automationsansatz** fokussiert, welches die Teilebenen „Fahrer selbst“, „Assistiert“, „Teilautomatisiert“ und „Hochautomatisiert“ enthält (vgl. Kapitel 4.2.1). Diese werden durch Systemmodi repräsentiert, welche auf die Basisfunktionalitäten der Fahrerassistenzsysteme ACC und LKS aufsetzen. Beginnend bei einer Fahrt ohne Assistenz schließen Fahrfunktionen an, welche die Nutzung eines ACC betreffen sowie integrierte Systemauslegungen in Form eines ACC mit assistierter bzw. fahrspurzentrierter Spurhaltung beinhalten (vgl. Kapitel 4.2.2). Daraus resultieren die **vier Systemmodi**: „Fahrer selbst (FS)“, „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“. Deren Betrachtung erfolgt für den Anwendungskontext einer **Fahrt auf der Autobahn** im normalen Verkehrsfluss (vgl. Kapitel 4.2.3). Unter der Annahme, dass die betrachteten Fahrfunktionen gleichzeitig in einem Fahrzeug verfügbar sind, werden zudem Übergabe-

bzw. Übernahmeszenarien integriert, welche sich zwischen dem Fahrer und den vier Systemstufen des Automationsansatzes ereignen. Auf Basis technischer und psychologischer Rahmenkriterien charakterisieren **vier Kernmerkmale** diese Transitionen (vgl. Kapitel 4.2.4). So wird erstens der **Grad der Kontrollverschiebung** unterschieden, welcher die Weite der Transition und damit das Ausmaß an verfügbarem Automationsgrad beschreibt. Zeitkritische Übergänge, in denen der Fahrer die Kontrolle unerwartet zurückerhält, fließen in dieses Merkmal ein. Zweitens geht die Art des Übergangs in die Betrachtung ein. Der Fokus liegt hier auf **indirekten Transitionen**, welche Zwischenstufen der Automationsbandbreite betreffen. An dritter Stelle erfolgt der Bezug zur **Ähnlichkeit der Systemmodi**. Dabei stellt sich die Frage, ob der Fahrer in Übergangssituationen einander funktional ähnliche Systeme kognitiv differenzieren kann. Das vierte Kriterium ergibt sich aus der Betrachtung der **Richtung der Transition**. So gehen hier sowohl Aktivierungs- als auch Deaktivierungsphasen ein, welche sich im Normalbetrieb oder an Systemgrenzen ereignen.

Im folgenden Abschnitt werden aufbauend auf den Rahmenbedingungen des Kapitels 4.2 spezifische Fragestellungen abgeleitet. Diese motivieren zugleich die Durchführung von zwei empirischen Erhebungen, welche sich im anschließenden Kapitel 4.4 in Form eines zusammenfassenden Überblicks wiederfinden.

### **4.3 Spezifische Fragestellungen**

Im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen Übergabe- sowie Übernahme-situationen innerhalb eines mehrstufigen Automationsansatzes, welcher durch vier Systemmodi aus dem Fahrkontext gekennzeichnet ist (vgl. Kapitel 4.2.2). Der Schwerpunkt der Analysen liegt dabei auf der Frage, ob dem Fahrer zu jeder Zeit bewusst ist, welcher Systemmodus gerade aktiv ist (vgl. Kapitel 4.1). Im Zentrum steht somit die Mode Awareness als notwendige Voraussetzung für angemessene Handlungs- und Entscheidungsprozesse. Da dieses Konstrukt im Automobilbereich bislang noch nicht ausreichend untersucht wurde, basiert der Untersuchungsansatz der vorliegenden Arbeit auf einem explorativem Vorgehen. Demgemäß wird mit Hilfe von Fahrerzustands-, Fahrerverhaltens- und Fahrerbewertungsdaten geprüft, ob in spezifischen Transitionssituationen das Phänomen Mode Confusion auftritt. Unter Einbezug der Rahmenkriterien des Kapitels 4.2 erfolgt hierfür die Betrachtung von Übergangsszenarien, die innerhalb des vierstufigen Automationsansatzes durch vier Kernmerkmale charakterisiert sind:

- Grad der Kontrollverschiebung
- Indirekte Transition
- Ähnlichkeit von Systemmodi
- Richtung der Transition

Diese Transitionsmerkmale sind daher die Basis für die Ableitung spezifischer Fragestellungen, welche die übergreifenden Fragen aus Kapitel 4.1 konkretisieren. Sie werden nachfolgend je Kriterium erläutert.

### Grad der Kontrollverschiebung

Fokus des Kriteriums ist die Frage, ob der Fahrer mit unterschiedlich weiten Verschiebungen der Fahrzeugkontrolle zwischen Fahrer und Automation zurechtkommt. Die Kernherausforderung besteht dabei darin, dass alle Automationsstufen gleichzeitig im Fahrzeug verfügbar sind. Der Fahrer muss demnach differenzieren, welche Funktion das System besitzt und welche Rolle er im jeweiligen Fall hat. Er benötigt somit ein möglichst korrektes Modell des jeweils aktivierten Systems und ist zudem gefordert, dies nach jeder Transition erneut anzupassen. Inkonsistenzen zwischen dem realen Systemverhalten und dem Modell seitens des Nutzers sollten sich auf der Verhaltens- und Bewertungsebene niederschlagen. Dabei ist anzunehmen, dass sich mit Hilfe zugehöriger Kenngrößen Zustandsdiagramme generieren lassen (vgl. Kapitel 3.2.2), welche für Transitionen sensibilisieren, die eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Automation Surprises besitzen. Auf diese Weise wird eine Grundlage geschaffen, um eine Balance zwischen technik- und menschenzentriertem Gestalten von Automatisierungssystemen im Fahrkontext herzustellen.

Im vorliegenden Fall besteht das potentiell denkbare Zustandsdiagramm aus Kontrollverschiebungen, die ein bis drei Automationsstufen umfassen können (vgl. Abbildung 28). Gemäß den Festlegungen in Abbildung 27, erfolgen diese Transitionen stets auf direktem Weg. Das heißt, der jeweilige Systemmodus wird entweder vom Fahrer vollständig aktiviert oder es findet eine komplette Deaktivierung der Funktion statt. Die Rückgaben der Kontrolle werden dabei durch Systemgrenzsituationen ausgelöst, deren Sondersituation ein zeitkritisches, vom Nutzer unerwartetes Szenario ist (vgl. Abbildung 27).

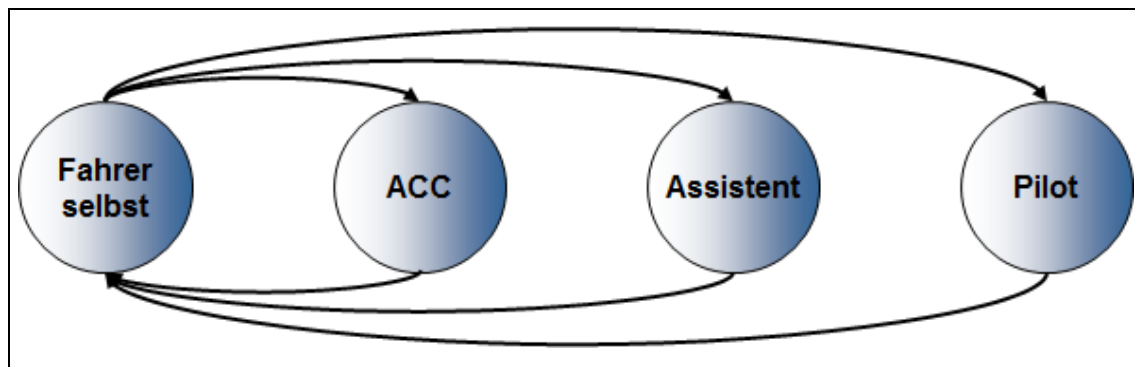


Abbildung 28: Zustandsdiagramm für das Merkmal „Grad der Kontrollverschiebung“



Gemäß Abbildung 28 und unter Einbezug des Kapitels 4.1 ergeben sich für den empirischen Teil der Arbeit folgende, spezifische Fragen zum Transitionsmerkmal „Grad der Kontrollverschiebung“:

Tabelle 9: Spezifische Forschungsfragen zum Grad der Kontrollverschiebung

Nr.	Grad der Kontrollverschiebung
1	Kann der Fahrer die unterschiedlichen Grade der Kontrollverschiebung von „Fahrer selbst“ auf „ACC“, „Assistent“ bzw. „Pilot“ oder umgekehrt kognitiv voneinander differenzieren?
2	Spielt bei der Kontrollverschiebung eine Rolle, wie stark der Nutzer nach der Transition in die Fahraufgabe eingebunden ist (Relation zwischen Start- und Endmodus)?
3	Lässt sich bezüglich der Anzahl an Automationsstufen eine übergeordnete Aussage dazu treffen, wieviel Modi der Fahrer maximal unterscheiden kann?

### **Indirekte Transition**

Fokus des Kriteriums ist die Frage, ob der Fahrer im Vergleich zu direkten Transitionen mit Übergängen über Zwischenstufen (Teilstufen der Automation) zurechtkommt. Offen ist hier, ob in Abhängigkeit des Systemmodus eine derartige Zwischenstufe die Übergabe bzw. Übernahme erleichtert oder erschwert. Mit Bezug zum Kapitel 4.2.4 wird postuliert, dass bei indirekten Übergängen Effekte wie Mode Confusion oder Mode Errors wahrscheinlicher sind. Der Fahrer ist dabei besonders in der kognitiven Trennung von Teilfunktionen gefordert, welche mit zunehmender Entbindung des Fahrers aus dem Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt in ihren Einzelzuständen weniger transparent sind. Inkonsistenzen im Systembewusstsein seitens des Nutzers sollten sich auch hier auf der Verhaltens- und Bewertungsebene niederschlagen und können in Zustandsdiagramme integriert werden.

Im vorliegenden Fall lassen sich die indirekten Transitionen gemäß des Zustandsdiagramms der Abbildung 29 integrieren. Unter Einbezug der Festlegungen aus Abbildung 27 ist dabei zu beachten, dass die Zwischenstufe in der vorliegenden Arbeit immer über den Systemmodus „ACC“ definiert ist. Das heißt, die Funktionen „Assistent“ oder „Pilot“ sind nur aus diesem Teilsystem heraus einschaltbar. Bei der Aktivierung kann dabei das „ACC“ selbst schon aktiv sein oder ist zunächst durch den Fahrer einzuschalten (vgl. Abbildung 29). Die empirische Analyse der indirekten Transitionen beruht anschließend auf dem Vergleich zur direkten Kontrollverschiebung und damit zu den Übergängen der Abbildung 28.

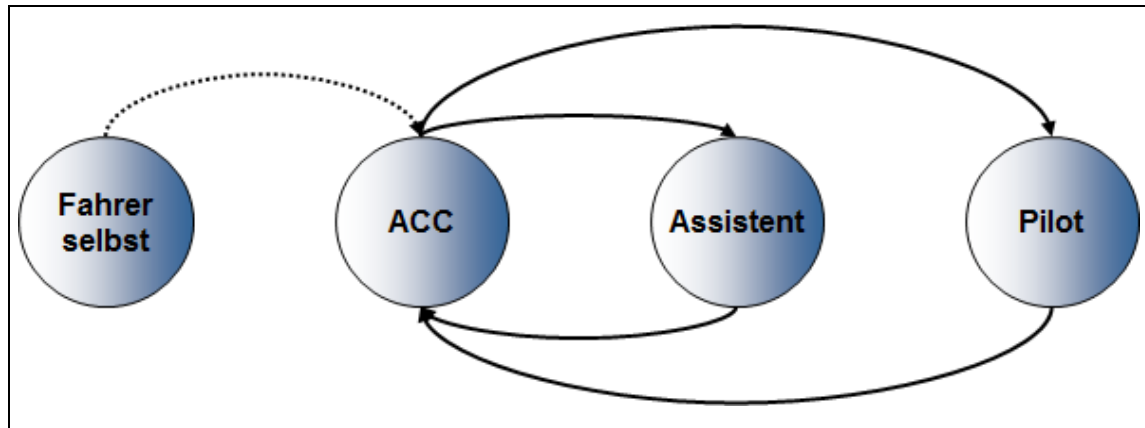


Abbildung 29: Zustandsdiagramm für das Merkmal „Indirekte Transition“

Gemäß der Abbildung 29 und unter Einbezug des Kapitels 4.1 ergeben sich für den empirischen Teil der Arbeit folgende, spezifische Fragen zum Transitionsmerkmal „Indirekte Transition“:

Tabelle 10: Spezifische Forschungsfragen zur indirekten Transition

Nr.	Indirekte Transition
1	Kann der Fahrer indirekte Transitionen, welche auf die Systemmodi „Assistent“ und „Pilot“ über die Zwischenstufe ACC erfolgen, kognitiv voneinander differenzieren?
2	Kann der Fahrer indirekte Transitionen, welche ausgehend von den Systemmodi „Assistent“ und „Pilot“ auf die Zwischenstufe ACC erfolgen, kognitiv voneinander differenzieren?
3	Spielt die modusabhängige Entbindung des Fahrers von der Fahraufgabe eine Rolle?

### Ähnlichkeit von Systemmodi

Fokus des Kriteriums ist die Frage, ob der Fahrer einander funktional ähnliche Systeme in Transitionssituationen unterscheiden kann. Hierbei wird postuliert, dass die Kombination von Einzelfunktionen in integrierte Systemauslegungen auf mentaler Ebene eine besondere Herausforderung darstellt. Findet zusätzlich ein ständiger Wechsel zwischen diesen Modi statt, sind Modusverwechslungen sehr wahrscheinlich (vgl. Kapitel 4.2.4). Demgemäß ist anzunehmen, dass primär erwartungsbasierte Mechanismen (Top-Down-Prozesse) die Aufmerksamkeit des Fahrers und dessen Verhalten steuern. So wird der Fahrer in Abhängigkeit der verfügbaren Automationsstufen mit der Transition einen bestimmten Zielmodus verbinden. Passt das Nutzermodell nicht zum realen Zustand, lassen sich die Inkonsistenzen im Systembewusstsein auf der Verhaltens- und Bewertungsebene aufzeigen und damit in Zustandsdiagramme integrieren.

Im vorliegenden Fall betrifft der Vergleich ähnlicher Systeme die Modi „Assistent“ und „Pilot“ (vgl. Festlegung in Abbildung 27). Das daraus resultierende Zustandsdiagramm ist in Abbildung 30 dargestellt.

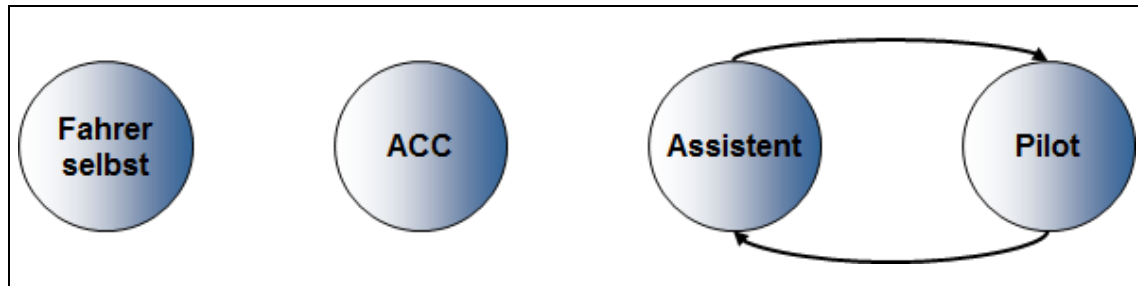


Abbildung 30: Zustandsdiagramm für das Merkmal „Ähnlichkeit von Systemmodi“

Für das Transitionsmerkmal „Ähnlichkeit von Systemmodi“ ergeben sich unter Einbezug des Kapitels 4.1 die spezifischen Fragen aus Tabelle 11:

Tabelle 11: Spezifische Forschungsfragen zur Ähnlichkeit von Systemmodi

Nr.	Ähnlichkeit von Systemmodi
1	Kann der Fahrer die funktional ähnlichen Systemmodi „Assistent“ und „Pilot“ in Übergangssituationen zwischen diesen Funktionen kognitiv voneinander differenzieren?
2	Wie wirkt sich die gleichzeitige Verfügbarkeit einander funktional ähnlicher Systeme im mehrstufigen Automationsansatz auf die generelle Fahrer-Fahrzeug-Interaktion in Transitionssituationen aus?

### Richtung der Transition

Fokus des Kriteriums ist die Frage, ob sich eine Aktivierung von Systemen durch den Fahrer im Vergleich zu einer Deaktivierung durch das System unterschiedlich auf der Verhaltens- bzw. Bewertungsebene auswirken. Im Kapitel 4.1 wurde diesbezüglich postuliert, dass das Phänomen Mode Confusion ebenfalls in Situationen auftreten kann, in denen der Fahrer Übergänge in Richtung Automation erlebt. Offen ist, welche Rahmenbedingungen in Abhängigkeit der Richtung Automation Surprises im Fahrkontext verursachen können. Da Übergeben der Kontrolle an das System (Aktivierungsphasen) und Übernahmen der Kontrolle durch den Fahrer (Deaktivierungsphasen) aufgrund der Zeit, die dafür zur Verfügung steht, nicht miteinander vergleichbar sind, geht das Merkmal eher auf globaler Ebene in die vorliegende Arbeit ein. Demgemäß werden die empirischen Studien und deren Ergebnisse stets richtungsspezifisch umgesetzt und ausgewertet (vgl. Kapitel 5, 6). Das heißt, die Darstellung erfolgt einzeln für Transitionen in Richtung Fahrer bzw. in Richtung Automation. Darin eingebettet werden die Merkmale „Grad der Kontrollverschiebung“, „Indirekte Transition“ und „Ähnlichkeit von Systemmodi“.

Abbildung 31 stellt nochmals die Differenzierung der zwei Richtungen von Transitionen und damit der Begrifflichkeiten „Übergabesituation“ sowie „Übernahmesituation“ grafisch dar.

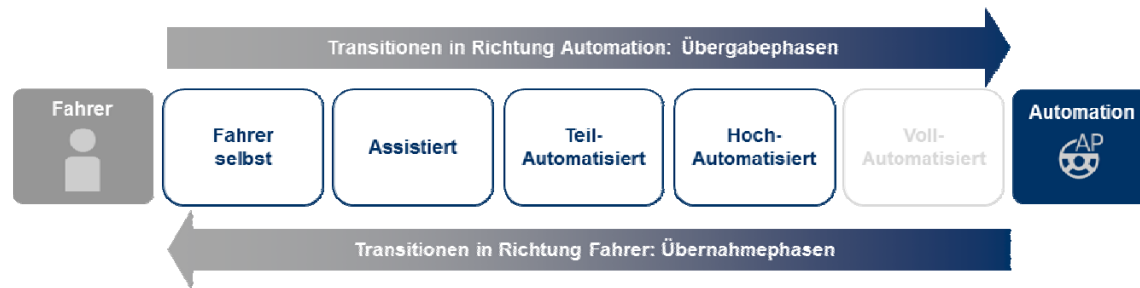


Abbildung 31: Darstellung der zwei Transitionsrichtungen zwischen Fahrer und Automation

Gemäß den vorangegangenen Erläuterungen und unter Einbezug des Kapitels 4.1 ergeben sich folgende, spezifische Fragen bezüglich der „Richtung der Transition“.

Tabelle 12: Spezifische Forschungsfragen zur Richtung der Transition

Nr.	Richtung der Transition
1	Wie wirken sich Transitionen vom Fahrer in Richtung Automation auf der Verhaltens- und Bewertungsebene unter Einbezug der Merkmale „Grad der Kontrollverschiebung“, „indirekte Transitionen“ und „Ähnlichkeit von Systemmodi“ aus?
2	Wie wirken sich Transitionen von der Automation in Richtung Fahrer auf der Verhaltens- und Bewertungsebene unter Einbezug der Merkmale „Grad der Kontrollverschiebung“, „indirekte Transitionen“ und „Ähnlichkeit von Systemmodi“ aus?
3	Treten bei einer der beiden Richtungen vermehrt Automation Surprises in Form von Mode Confusion oder Mode Errors auf?

Um die spezifischen Fragen des Kapitels 4.3 beantworten zu können, werden in der vorliegenden Arbeit zwei verschiedene Untersuchungsansätze gewählt. Einen Überblick über deren grundlegende Struktur und Ausrichtung gibt das folgende Kapitel 4.4.

Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass diese Arbeit zudem übergeordnete Fragen adressiert, die die Erkenntnisbasis zu Automation und Transition im Fahrkontext erweitern soll:

- Lassen sich mit Bezug auf die betrachteten Transitionen im ausgewählten Automationsansatz übergeordnete Rahmenbedingungen definieren, die mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für Automation Surprises im Fahrkontext einhergehen?
- Welche Parameter eignen sich, um Automation Surprises in Form von Mode Confusion oder Mode Errors im Fahrkontext abzubilden?
- Welche Unterschiede und Gemeinsamkeiten im Kontext von Automation und Transition bestehen zwischen dem Automobil- und Luftfahrtbereich?

#### 4.4 Studienüberblick zur Untersuchung der Fragestellungen

Der empirische Teil der vorliegenden Arbeit setzt sich aus insgesamt zwei Versuchsreihen zusammen (vgl. Kapitel 5, 6), um den Forschungsgegenstand unter verschiedenen Bedingungen zu analysieren. So finden die Betrachtungen in realen (vgl. Kapitel 5) sowie simulierten Testumgebungen (vgl. Kapitel 6) statt. Einen ersten Überblick über zugehörige Studienschwerpunkte und methodische Eckdaten geben die folgenden Kapitel 4.4.1 und 4.4.2. Die inhaltliche Konkretisierung der zwei Untersuchungen sowie deren Verknüpfung zu den spezifischen Fragestellungen der Arbeit folgen in den jeweiligen Kapiteln der Studien.

##### 4.4.1 Untersuchungsschwerpunkte der zwei durchgeführten Studien

Im Rahmen der **ersten Untersuchung** dieser Arbeit sollen grundlegende Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wie der Fahrer mit den ausgewählten Charakteristika der Übergabe- und Übernahme-situationen zwischen den vier Systemmodi des Automationsansatzes umgeht. Auf explorativer Basis wurde diesbezüglich untersucht, ob es in den betrachteten Transitionssituationen Übergänge gibt, die deutlich von den Erwartungen der Fahrer abweichen oder sogar nicht intendierte Nebeneffekte in Form von Mode Confusion oder Mode Errors hervorrufen. Der Fokus hierbei lag neben der richtungsspezifischen Betrachtung der Transition auf den Merkmalen „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Indirekte Transition“. Um in der ersten Studie gleichfalls eine realistische Einbettung der Systemmodi in den Kontext einer Autobahnfahrt zu erreichen, fand die Untersuchung im **realen Straßenverkehr** statt. Dies hatte zudem den Vorteil einer hohen externen Validität der Ergebnisse. Eine Zusammenfassung der Schwerpunkte der ersten Studie findet sich in Abbildung 32.

Dem Anspruch einer hohen internen Validität wird die **zweite Untersuchung** der vorliegenden Arbeit gerecht. Sie fand unter systematisch variierbaren Versuchsbedingungen im **Fahrsimulator** statt (vgl. Abbildung 32). Neben der besseren Kontrolle von Störvariablen, konnten in diesem Setting ebenso zeitkritische Situationen eingebunden werden. Die Untersuchung stellt zudem eine Erweiterung der ersten Studie dar und berücksichtigt zusätzlich das Transitionsmerkmal „Ähnlichkeit von Systemmodi“ (vgl. Abbildung 32). Des Weiteren wurde die Dauer der Fahrt im jeweiligen Systemmodus verlängert und die Anzahl der untersuchten Probanden erhöht (vgl. Kapitel 4.4.2). Die Datenbasis, welche analog zur ersten Studie Fahr- und Videodaten enthielt, konnte darüber hinaus um psychophysiologische Fahrerzustandsparameter erweitert werden (vgl. Abbildung 33).

	Studie 1 Realfahrt auf Autobahn	Studie 2 Simulatorfahrt auf Autobahn
<b>Schwerpunkt der Studie</b>	<b>Hauptfokus:</b> Umgang des Fahrers mit Transitions-situationen zwischen vier Systemmodi eines vierstufigen Automationsspektrums unter realen Testbedingungen	<b>Hauptfokus:</b> Umgang des Fahrers mit erweiterten Transitionssituationen zwischen vier Systemmodi eines vierstufigen Automationsspektrums unter simulierten Testbedingungen sowie längerer Systemnutzungsdauer
<b>Spektrum an Automation und zugehörige Systemmodi</b>	<b>Automationsspektrum:</b> - Fahrer selbst - Assistiert - Teilautomatisiert - Hochautomatisiert  <b>Systemmodi:</b> - Fahrer selbst - ACC - Assistent - Pilot	<b>Automationsspektrum:</b> - Fahrer selbst - Assistiert - Teilautomatisiert - Hochautomatisiert  <b>Systemmodi:</b> - Fahrer selbst - ACC - Assistent - Pilot
<b>Anwendungsfälle und Merkmale der Transitionen</b>	<b>Betriebszustand:</b> - Normalbetrieb - Systemgrenze  <b>Merkmal der Transition:</b> - Grad der Kontrollverschiebung - Indirekte Transition - Richtung der Transition	<b>Betriebszustand:</b> - Normalbetrieb - Systemgrenze  <b>Merkmal der Transition:</b> - Grad der Kontrollverschiebung - Indirekte Transition - Ähnlichkeit von Systemmodi - Richtung der Transition

Abbildung 32: Untersuchungsschwerpunkte der zwei durchgeführten Studien

#### 4.4.2 Methodische Eckdaten der zwei durchgeführten Studien

In Ergänzung zu den Untersuchungsschwerpunkten stellt Abbildung 33 aggregiert die methodischen Gesichtspunkte der zwei durchgeführten Studien dar. Diese umfassen die folgenden Kategorien:

- Testmethodik
- Testkontext
- Testdauer
- Testdesign
- Stichprobe
- Erhobene Daten

Die genaue Erläuterung der Kategorien erfolgt in den jeweiligen Methodenkapiteln der zwei durchgeführten Untersuchungen (vgl. Kapitel 5.3, 6.3).

	Studie 1 Realfahrt auf Autobahn	Studie 2 Simulatorfahrt auf Autobahn
<b>Testmethodik</b>	<b>Realer Fahrversuch:</b> - Versuchsfahrzeug - Wizard-of-Oz Methode	<b>Fahrsimulatortest:</b> - statischer Fahrsimulator - Fahrzeug Mock-up
<b>Testkontext</b>	<b>Versuchsstrecke:</b> - Autobahn A9 - München nach Ingolstadt	<b>Versuchsstrecke:</b> - simulierter, monotoner Autobahnabschnitt
<b>Testdauer</b>	<b>Gesamtdauer:</b> - 10 min Vorbereitung - 60 min Fahrdauer - 15 min Befragung - 5 min Nachbereitung	<b>Gesamtdauer:</b> - 30 min Vorbereitung - 4 x 20 min Fahrdauer - 50 min Befragung - 10 min Nachbereitung
<b>Testdesign</b>	<b>Versuchsplan:</b> - 2-faktoriell	<b>Versuchsplan:</b> - 2-faktoriell mit Messwiederholung
<b>Stichprobe</b>	<b>Probanden:</b> - n = 20 (9 ♀, 11 ♂)	<b>Probanden:</b> - n = 80 (♂)
<b>Erhobene Daten</b>	<b>Objektiv:</b> - Fahrdaten - Videodaten  <b>Subjektiv:</b> - Fragebogendaten	<b>Objektiv:</b> - Fahrdaten - Videodaten - Physiologische Daten  <b>Subjektiv:</b> - Fragebogendaten

Abbildung 33: Methodische Eckdaten der zwei durchgeführten Studien

## 5 Studie I: Realfahrt auf der Autobahn mit einem Wizard-of-Oz Fahrzeug

In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung der ersten von insgesamt zwei durchgeführten Studien der vorliegenden Arbeit. Schwerpunktmäßig wird hierbei zunächst auf die Untersuchungsziele (Kapitel 5.1), auf die Hauptfragestellungen (Kapitel 5.2) und auf die methodischen Gesichtspunkte (Kapitel 5.3) eingegangen. Im Abschnitt 5.4 folgt eine Beschreibung der erhobenen Daten, die in den Ergebnisteil der Realfahrtuntersuchung überführen (Kapitel 5.5). Den Abschluss des Kapitels bildet ein zusammenfassendes Fazit (Kapitel 5.6). Dieses wird im Kapitel 7 in die inhaltliche und methodische Diskussion der Ergebnisse beider Untersuchungen der Arbeit eingebunden. Im Vordergrund steht hier die kritische Analyse der Erkenntnisse unter Beachtung des Forschungsschwerpunktes der Arbeit (vgl. Kapitel 4).

### 5.1 Ziele

Das übergeordnete Ziel der **Realfahrtstudie** ist, erste Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie der Fahrer mit unterschiedlich stark automatisierten Fahrfunktionen interagiert, die gleichzeitig im Fahrzeug verfügbar sind. Diese betreffen die Systemmodi „Fahrer selbst“ (FS), „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ (vgl. Kapitel 4.2.2) innerhalb eines **vierstufigen Automationsansatzes** (vgl. Kapitel 4.2.1). Im Vordergrund steht die Analyse der Auswirkungen von ausgewählten **Übernahme- und Übergabesituationen** auf das Fahrerverhalten und die Fahrerbewertungen. Auf explorativer Basis wird diesbezüglich untersucht, ob es Übergänge gibt, die deutlich von den Erwartungen des Nutzers abweichen oder sogar nicht intendierte Automationseffekte in Form von Mode Confusion bzw. Mode Errors hervorrufen. Hierfür findet die Integration von Transitionssituationen statt, die mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für derartige Folgeerscheinungen einhergehen (vgl. Kapitel 4.2.4). Jene beziehen sich in der ersten Studie auf Übergänge, die durch einen unterschiedlich hohen **Grad der Kontrollverschiebung** und durch **indirekte Transitionen** gekennzeichnet sind. Sie werden zudem in Anwendungsfälle eingebettet, die in **Richtung Automation** Systemaktivierungen und in **Richtung Fahrer** Systemabwürfe betreffen.

Da für den Fahrkontext bisher keine Erkenntnisse zum Umgang des Fahrers mit derartig komplexen Transitionen unter natürlichen Testbedingungen vorliegen (vgl. Kapitel 3.2.5), basiert die Studie auf einer Realfahrtuntersuchung. Dies hat einerseits den Vorteil, dass die erhaltenen Ergebnisse eine hohe externe Validität aufweisen und das Zusammenspiel des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug-Umwelt einbinden. Andererseits ergibt sich somit die Möglichkeit, die vier Systemmodi direkt in dem für sie realistischen Anwendungskontext zu betrachten.



## 5.2 Fragestellung und Hypothesen

Gemäß den genannten Zielen analysiert die erste Studie Transitionssituationen, welche durch die Merkmale „**Grad der Kontrollverschiebung**“, „**Indirekte Transition**“ und „**Richtung der Transition**“ charakterisiert sind. Mit Bezug zum Forschungsschwerpunkt der Arbeit (vgl. Kapitel 4) stellt sich dementsprechend die Frage, ob in De- bzw. Aktivierungsphasen innerhalb eines mehrstufigen Automationsansatzes unterschiedlich weite Verschiebungen der Fahrzeugkontrolle sowie Übergänge auf Zwischenstufen der Automation zu Effekten führen können, die mit einem „Lack of Mode Awareness“ in Verbindung stehen (vgl. Kapitel 4.3). In dem Zusammenhang interessieren vor allem Auffälligkeiten im Fahrerverhalten (z.B. verzögerte bzw. unangemessene Reaktionen) oder in den Nutzerbewertungen (z.B. Angaben von Intransparenz), die auf Inkompatibilitäten zwischen dem erwarteten und realen Systemverhalten schließen lassen. Jene würden auf explorativer Basis auf falsche Annahmen im mentalen Systemmodell und damit auf Einbußen in der Mode Awareness hindeuten. Derartige Transitionen wären dann bei der Gestaltung von Übergabe- und Übernahme-situationen aufgrund der erhöhten Wahrscheinlichkeit für Mode Confusion oder Mode Errors zu vermeiden.

Für die erste Studie der vorliegenden Arbeit ergeben sich die Hypothesen der Tabellen 13 und 14. Diese postulieren auf explorativer Grundlage die Auswirkung der betrachteten Merkmale von Transitionen auf der Verhaltens- und Bewertungsebene. Sie beziehen sich hierfür auf die spezifischen Fragestellungen des Kapitels 4.3. Zudem trennen die Annahmen zwischen der Richtung der Transition. Hintergrund dessen ist, dass der Fahrer bei der Aktivierung viel mehr Zeit für die Handlung zur Verfügung hat, als bei der Übernahme eines Systems (vgl. Kapitel 4.3). Die resultierenden Reaktionen sind daher nicht direkt miteinander vergleichbar. Deshalb werden die Hypothesen und auch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit richtungsspezifisch betrachtet. Als Datenbasis dienen in der ersten Untersuchung Fahrdaten, Videodaten und subjektive Daten (Kapitel 5.4).

Tabelle 13: Hypothesen der ersten Studie für Transitionen in **Richtung Automation**

Haupteffekt „Grad der Kontrollverschiebung“
Der Grad der Kontrollverschiebung vom Systemmodus „Fahrer selbst“ auf einen höher automatisierten Modus hat einen Einfluss auf die kognitive Differenzierungsfähigkeit des Fahrers. Je stärker der Fahrer dabei gefordert wird, Teilfunktionen der Automation in Relation zur eigenen Rolle bei der Fahrzeugführung zu unterscheiden, desto mehr Zeit benötigt er, um den Systemmodus zu verstehen und desto wahrscheinlicher sind Einbußen im Modusbewusstsein. Daher wird angenommen, dass die Funktionskomplexität des hochautomatisierten Modus „Pilot“ bei der Systemaktivierung eher zu Effekten auf Verhaltens- und Bewertungsebene führt. Diese könnten sich im Fahrerverhalten in verzögerten Reaktionen, in einem charakteristischen Blickverhalten sowie in subjektiven Angaben zur Intransparenz und fehlenden Nachvollziehbarkeit des Übergangs ausdrücken. Sie würden sich in der Folge nachteilig auf den Aufbau eines adäquaten Systemmodells auswirken und damit die Mode Awareness mindern.

**Haupteffekt „Indirekte Transition“**

Die kognitive Differenzierungsfähigkeit von Teilfunktionen wird bei indirekten Übergängen über Zwischenstufen der Automation zusätzlich erschwert. Der Fahrer ist hierbei stärker darin gefordert, Teilfunktionen der Automation in Relation zur eigenen Rolle bei der Fahrzeugführung zu unterscheiden. Indirekte Transitionen auf den Systemmodus „Assistent“ bzw. „Pilot“ über die Zwischenstufe „ACC“ gehen daher mit Effekten auf der Verhaltens- und Bewertungsebene einher, welche sich nachteilig auf den Aufbau eines adäquaten Systemmodells auswirken könnten. Mit dieser Art der Transition angenommene Einbußen im Modusbewusstsein zeigen sich in Form von verzögerten Reaktionen, in einem charakteristischen Blickverhalten und drücken sich in subjektiven Angaben zur wahrgenommenen Transparenz des Übergangs aus.

Tabelle 14: Hypothesen der ersten Studie für Transitionen in **Richtung Fahrer**

**Haupteffekt „Grad der Kontrollverschiebung“**

Der Grad der Kontrollverschiebung von höher automatisierten Funktionen zurück auf den Fahrer wirkt sich unterschiedlich auf der Verhaltens- und Bewertungsebene aus. Je stärker der Grad der vorausgehenden Entbindung aus der Fahraufgabe ist, desto höhere Anforderungen werden an den Fahrer bei der Übernahme gestellt. Da der Fahrer Zeit benötigt, um sich seiner Rolle wieder bewusst zu werden, führt die Kontrollverschiebung aus dem Modus „Pilot“ eher zu verzögerten oder ausbleibenden Handlungen. Der hohe Grad der Kontrollverschiebung sollte sich gleichfalls in subjektiven Bewertungen der Transition niederschlagen.

**Haupteffekt „Indirekte Transition“**

Die kognitive Differenzierungsfähigkeit von Teilfunktionen wird bei indirekten Übergängen auf eine Zwischenstufe der Automation zusätzlich erschwert. Der Fahrer ist hierbei stärker darin gefordert, zu verstehen, welche Teilfunktion die Automation und welche er selbst bei der Fahrzeugführungsaufgabe hat. Indirekte Transitionen vom Systemmodus „Assistent“ bzw. „Pilot“ auf die Zwischenstufe „ACC“ gehen daher mit Effekten auf der Verhaltens- und Bewertungsebene einher, die für Einbußen im Modusbewusstsein sprechen. Sie drücken sich neben subjektiven Angaben zur mangelnden Transparenz des Übergangs, in verzögerten Reaktionen des Fahrers und einem charakteristischem Blickverhalten aus.

Neben den postulierten Haupteffekten der Tabellen 13 und 14 werden gleichfalls deren Wechselwirkungen untereinander in der Arbeit geprüft. Dabei sind die Interaktionen aus Tabelle 15 anzunehmen:

Tabelle 15: Hypothesen zur Wechselwirkung der betrachteten Transitionsmerkmale

**Wechselwirkungseffekte in Richtung Automation**

Ein hoher Grad der Kontrollverschiebung geht bei indirekten Transitionen über Zwischenstufen der Automation im Vergleich zu direkten mit stärkeren Effekten auf der Verhaltens- und Bewertungsebene einher. Der Übergang in den Systemmodus „Pilot“ über „ACC“ führt demnach im Vergleich zur direkten Aktivierung aus „Fahrer selbst“ eher zu Einbußen im Modusbewusstsein. Dies gilt auch für den Vergleich zum indirekten Übergang in den Modus „Assistent“.

**Wechselwirkungseffekte in Richtung Fahrer**

Ein hoher Grad der Kontrollverschiebung geht bei indirekten Transitionen auf eine Zwischenstufe der Automation im Vergleich zu direkten mit stärkeren Effekten auf der Verhaltens- und Bewertungsebene einher. Der Übergang aus dem Systemmodus „Pilot“ in „ACC“ führt demnach im Vergleich zur vollständigen Deaktivierung eher zu Einbußen im Modusbewusstsein. Dies gilt auch für den Vergleich zum indirekten Übergang aus dem Modus „Assistent“ auf „ACC“.

Über diese Annahmen hinausgehend wird erwartet, dass insbesondere die Komplexität und Anzahl der Systemmodi im betrachteten Automationsansatz die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der einzelnen Systeme erschwert. Hierbei ist offen, ob anhand der Daten der ersten Studie eine übergeordnete Aussage zu der maximalen Anzahl an gleichzeitig verfügbaren Systemen im Fahrzeug getroffen werden kann. Zudem stellt sich die Frage, ob dies von der Art der Fahrfunktionen abhängig ist. So könnte es für den Fahrer mit zunehmender Automatisierung leichter sein, wenn neben der komplexen Funktion weniger zusätzliche Systeme mit Teilfunktionen dieser im Fahrzeug verfügbar sind. In dem Zusammenhang ist anzunehmen, dass Einbußen im Modusbewusstsein vor allem bei Kontrollrückgaben in Richtung Fahrer reduzierbar sind. Abschließend besteht die Frage, welche objektiven und subjektiven Parameter sich eignen, um Mode Confusion bzw. Mode Errors im Fahrkontext abzubilden.

Das nächste Kapitel widmet sich der methodischen Umsetzung der Studie als Basis zur Überprüfung der genannten Hypothesen und Fragestellungen.

### **5.3 Methodische Umsetzung**

In diesem Abschnitt werden die methodischen Rahmenbedingungen der ersten Studie erläutert. Beginnend bei der Darstellung der Automationsstufen (Kapitel 5.3.1) und der integrierten Anwendungsfälle für Transitionen (Kapitel 5.3.2), beschreibt das Kapitel 5.3.3 die angewandte Technik zur Untersuchung der Übergangssituationen im realen Fahrgeschehen. Daran anschließend folgt die Erläuterung des eigentlichen Versuchs, inklusive Teststrecke, Versuchsplanung und Stichprobe (vgl. Kapitel 5.3.4 bis 5.3.7).

#### **5.3.1 Automationsstufen**

In der ersten Studie wurde von dem Automationsansatz ausgegangen, dessen Ableitung bereits im Kapitel 4.2.1 erfolgte. Die dabei ausgewählten vier Teilstufen von Automation (vgl. Abbildung 21) sind durch die im Kapitel 4.2.2 zugeordneten Systemmodi „Fahrer selbst“, „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ repräsentiert (vgl. Abbildung 22). Sie sind im Sinne eines Migrationspfades als aufeinander aufbauende Fahrfunktionen unterschiedlichen Automatisierungsgrads zu betrachten. Mit Bezug zur übergeordneten Automationsebene stellt Abbildung 34 diese **vier Systemmodi** der ersten Studie nochmals zusammenfassend dar. Deren konkrete Auslegung und Implementierung im Versuch wird im Abschnitt 5.3.3 näher erläutert.

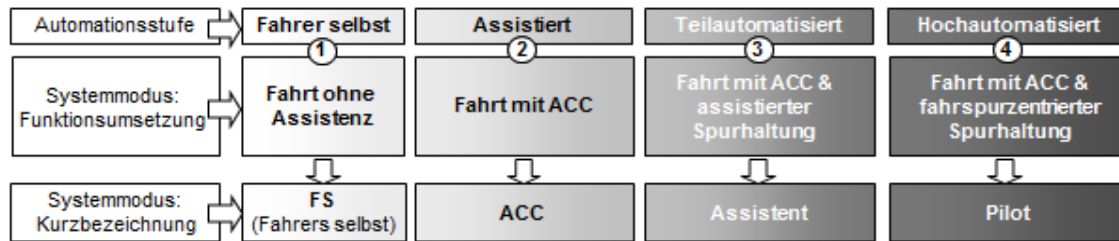


Abbildung 34: Automationsstufen und Systemmodi der ersten Studie

### 5.3.2 Integrierte Anwendungsfälle für Transitionen

In der Realfahrtuntersuchung wurden insgesamt **acht unterschiedliche Use Cases** für Transitionssituationen zwischen Fahrer und Automation betrachtet. Sie sind in Abbildung 35 in Form eines **Zustandsdiagramms** dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Legende der Abbildung 35 auf die bereits im Kapitel 4.3 erläuterten Übergänge der ausgewählten Merkmale von Transitionen hinweist. Sie beinhaltet demnach die Zuordnung der nummerierten Transitionen der Abbildung 35 zu den Merkmalen „Grad der Kontrollverschiebung“ (vgl. Abbildung 28), „Indirekte Transition“ (vgl. Abbildung 29) und „Richtung der Transition“ (vgl. Abbildung 31). Diesbezüglich ist anzumerken, dass die erste Studie der vorliegenden Arbeit die ausschließliche Aktivierung bzw. Deaktivierung des Systemmodus „ACC“ noch nicht berücksichtigte. Die Gründe hierfür lagen vor allem im Versuchsdesign (vgl. Kapitel 5.3.5), welches durch die Teststrecke (vgl. Kapitel 5.3.4) und den Versuchsablauf (vgl. Kapitel 5.3.6) im Umfang eingeschränkt war.

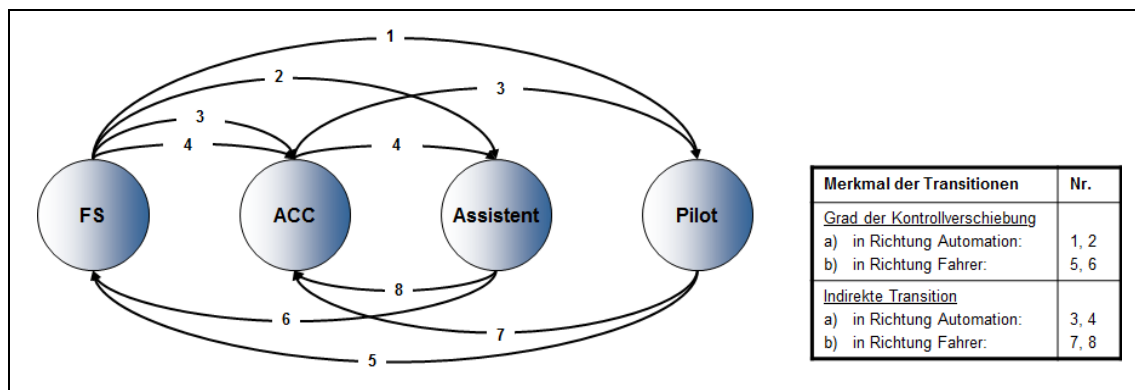


Abbildung 35: Transitionssituationen zwischen den Systemmodi der ersten Studie

Die konkrete Beschreibung der Transitionssituationen in der Studie findet sich in den Tabellen 16 und 17. Sie lehnt sich an die im Kapitel 4.2.4 erfolgte Ableitung aus technischer und psychologischer Sicht an. Sie repräsentiert folglich die Strukturierungslogik der vorliegenden Arbeit für **Anwendungsfälle im Fahrkontext** (vgl. hierzu Abbildung 27). Es erfolgt erneut eine Trennung in der tabellarischen Darstellung nach der Richtung der Transition.

Tabelle 16: Beschreibung der Transitionen in **Richtung Automation** aus Abbildung 35

Nr.	Transitionssituationen
1	Der Fahrer aktiviert den fahrzeugseitig verfügbaren Systemmodus „Pilot“ erfolgreich. Es findet dabei ein direkter Übergang von „FS“ auf „Pilot“ statt. Das System übernimmt die Längs- und Querführung des Fahrzeugs.
2	Der Fahrer aktiviert den fahrzeugseitig verfügbaren Systemmodus „Assistent“ erfolgreich. Es findet dabei ein direkter Übergang von „FS“ auf „Assistent“ statt. Das System übernimmt die Längsführung des Fahrzeugs und assistiert bei dessen Querführung.
3	Der Fahrer aktiviert den fahrzeugseitig verfügbaren Systemmodus „Pilot“ indirekt über den Zwischenmodus „ACC“. Das System übernimmt folglich zuerst die Längsführung des Fahrzeugs und schaltet nach Bestätigung des Systemangebots „Pilot“ die Querführung hinzu.
4	Der Fahrer aktiviert den fahrzeugseitig verfügbaren Systemmodus „Assistent“ indirekt über den Zwischenmodus „ACC“. Das System übernimmt folglich zuerst die Längsführung des Fahrzeugs und assistiert nach Bestätigung des Systemangebots „Assistent“ bei der Querführung.

Tabelle 17: Beschreibung der Transitionen in **Richtung Fahrer** aus Abbildung 35

Nr.	Transitionssituationen
5	Der Systemmodus „Pilot“ wird infolge der Erreichung von Systemgrenzen fahrzeugseitig deaktiviert. Es findet dabei ein direkter Übergang von „Pilot“ auf „FS“ statt. Das System gibt die Längs- und Querführung des Fahrzeugs vollständig an den Fahrer zurück.
6	Der Systemmodus „Assistent“ wird infolge der Erreichung von Systemgrenzen fahrzeugseitig deaktiviert. Es findet dabei ein direkter Übergang von „Assistent“ auf „FS“ statt. Das System gibt die Längs- und Querführung des Fahrzeugs vollständig an den Fahrer zurück.
7	Der Systemmodus „Pilot“ wird infolge der Erreichung von Systemgrenzen fahrzeugseitig deaktiviert. Es findet dabei ein indirekter Übergang von „Pilot“ auf den verfügbaren Modus „ACC“ statt. Das System gibt die Querführung des Fahrzeugs vollständig an den Fahrer zurück und behält die Kontrolle über die Längsführung bei.
8	Der Systemmodus „Assistent“ wird infolge der Erreichung von Systemgrenzen fahrzeugseitig deaktiviert. Es findet dabei ein indirekter Übergang von „Assistent“ auf den verfügbaren Modus „ACC“ statt. Das System gibt die Querführung des Fahrzeugs vollständig an den Fahrer zurück und behält die Kontrolle über die Längsführung bei.

Gemäß den Tabellen 16 und 17 lag der Schwerpunkt zum einen auf Transitionen, die über eine fahrerseitige Aktivierung von Systemen im **Normalbetrieb** eine Zunahme an Automation bewirken (vgl. Nr. 1 bis 4 in Tabelle 16). Zum anderen wurden Übergänge an **Systemgrenzen** betrachtet, die infolge der Deaktivierung von Fahrfunktionen Transitionen in Richtung Fahrer auslösten (vgl. Nr. 5 bis 8 in Tabelle 17). In beiden Fällen variierte einerseits der Automatisierungsgrad der ein- bzw. ausgeschalteten Funktion und somit das Ausmaß der Kontrollverschiebung zwischen Fahrer und Automation. In der ersten Untersuchung betraf dies die De- und Aktivierung der Modi „Assistent“ bzw. „Pilot“ (vgl. Abbildung 35). Andererseits differierte die Art des erfolgten Übergangs. Demgemäß wurden sowohl direkte (vgl. Nr. 1, 2 und 5, 6 in Abbildung 35) als auch indirekte Übergänge integriert (vgl. Nr. 3, 4

und 7, 8 in Abbildung 35). Da der Fahrversuch im Realverkehr stattfand, ging die Analyse zeitkritischer Kontrollverschiebungen in Richtung Fahrer noch nicht in die Betrachtungen ein.

### **5.3.3 Versuchsfahrzeug**

Da vor allem der Systemmodus „Pilot“ in seiner Auslegung als Gesamtfunktion über den derzeitigen Serienstand an gleichzeitig im Fahrzeug verfügbaren Fahrerassistenzfunktionen hinausgeht, wurde für die Implementierung im Realfahrzeugversuch auf eine spezielle Methode zurückgegriffen. Jene umgeht die eingeschränkte Verfügbarkeit technischer Systemkomponenten und ist nicht auf die Bereitstellung komplexer Sensoriken oder funktio-nierender Algorithmen angewiesen. Sie stammt aus dem Rapid Prototyping (Gebhardt, 2000) und ermöglicht über die frühzeitige Kenntnis der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion eine iterative Gestaltung von Design- bzw. Entwicklungsprozessen (Nielsen, 1993; Preece et al., 1994). Ein spezifisches Vorgehen ist dabei dem sogenannten „High Fidelity Prototyping“ zu-ordenbar. Bei dieser Technik muss entweder ein Prototyp vorliegen, der in Aussehen und Funktionalität möglichst genau dem Endprodukt entspricht oder es wird auf Wizard-of-Oz Systeme zurückgegriffen. Letztere sind immer dann zielführend, wenn noch keine Vorab-Exemplare einer späteren Serienfertigung bzw. Vorführmodelle (Mock-up) von Funktionen vorhanden sind. Folglich eignen sich jene besonders zur methodischen Umsetzung der Systemmodi in der Realfahrtstudie dieser Arbeit.

Um einen prinzipiellen Einblick in Wizard-of-Oz Systeme zu erhalten, gibt der folgende Abschnitt nähere Informationen zu deren Herkunft und Einsatzbereich. Daran anschließend wird dargestellt, wie die Wizard-of-Oz Methode auf ein Straßenfahrzeug appliziert wurde. Zudem erfolgt die Erläuterung der technischen Umsetzungsschritte, welche in der ersten Studie die Auslegung der vier Systemmodi sowie die Gestaltung der Anzeige und Bedienung im verwendeten Versuchsträger betrafen.

### **Prototyping mit der Wizard-of-Oz Methode**

Die Bezeichnung Wizard-of-Oz (WOz) stammt ursprünglich aus einem Kinderbuch von Baum (1900), wo der Zauberer von Oz - eigentlich ein kleiner, alter Mann - mit Hilfe von raffinierten Effekten als mächtiger Magier auftrat. Die Vortäuschung nicht realer bzw. nachgeahmter Dinge findet sich heutzutage in geringfügig abgewandelter Form in Wizard-of-Oz Studien wieder. Hierunter versteht man die Simulation eines noch nicht vollständig implementierten Systems oder von komplexen technischen Prozesse durch einen Menschen - einen Wizard. In Anlehnung an das Märchen wird dem Benutzer demnach eine Schnittstellenemulation angeboten, welche für den Benutzer unsichtbar auf Eingaben über einen Wizard als stellver-tretendes System antwortet (Kraiss, 2004). Die Interaktion zwischen Nutzer und Wizard

erlaubt tiefergehende Analysen, mit deren Hilfe Wünsche und Bedürfnisse, die am „realen“ Objekt identifiziert wurden, iterativ im Entwicklungs- bzw. Designprozess eingebunden werden können (Salber & Coutaz, 1993; Dow et al., 2005). Die Wizard-of-Oz Methode stellt somit eine Schlüsseltechnik für die Schaffung eines dynamischen Gleichgewichts aus technik- und nutzerzentriertem Vorgehen dar. Seit den 90er Jahren finden sich dazu vermehrt Applikationen in der Sprachdialogforschung (vgl. Richards & Underwood, 1984; Krause, 1992; Bernsen, Dybkjaer & Dybkjaer, 1994; Dahlbäck & Jönsson, 1994). Vielfach handelte es sich dabei um unimodale Spracheingabe- und -ausgabesysteme, wie z.B. Telefoninformationsservices. Diese wurden im weiteren Entstehungsprozess um multimodale Systeme erweitert (Salber & Coutaz, 1993). Der Wizard simuliert hier z.B. die Erkennung und Interpretation der Spracheingaben und reagiert entsprechend korrekt oder beabsichtigt fehlerhaft. Daneben existieren im automotiven Umfeld erste Umsetzungen der Technik in Virtual Reality Umgebungen oder Fahrsimulationen (vgl. Bengler, 1995; Salmen et al. 1999; Detemple, 2000; Neuss, 2000; Liu 2001). Biester (2005) und Schomerus et al. (2006) beschreiben beispielsweise die Applikation der WOz-Technik in einem feststehenden Fahrsimulator, um verschiedene Grade der Kontrolle bei hochautomatisierten Fahrzeugen zu untersuchen.

### **Applikation der Wizard-of-Oz Methode in einem Straßenfahrzeug**

Neben den eben beschriebenen Umsetzungen der WOz-Methode findet sich in der Volkswagen Konzernforschung eine fortgeschrittene Form der Implementierung (Schmidt et al, 2008). Hier wurde die Technik direkt auf ein Straßenfahrzeug übertragen. Hintergrund dessen war die Motivation, ein Werkzeug zur Verfügung zu haben, mit dem zukünftige Technologien im Bereich Fahrerassistenz in Realfahrzeuguntersuchungen simulierbar und evaluierbar sind. Der prinzipielle Aufbau des entstandenen Versuchsträger ist in Abbildung 36 und 37 dargestellt.

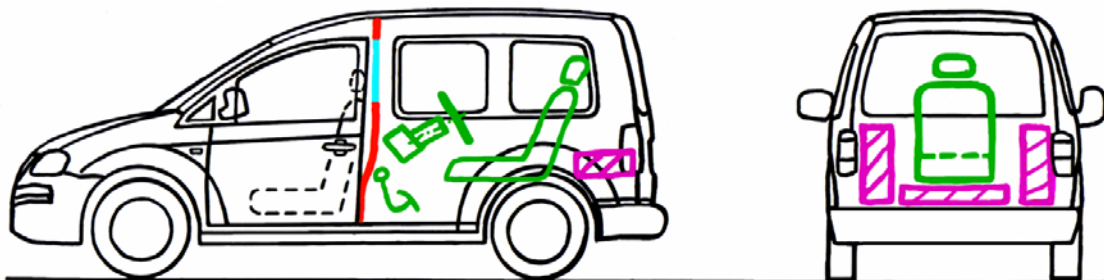


Abbildung 36: Schematische Darstellung der Wizard-of-Oz Technik in einem Fahrzeug

Für den grundlegenden Aufbau des Versuchsträgers wurde ein VW Touran mit Direktschaltgetriebe verwendet. In diesem erfolgte zunächst die Entfernung der Rücksitze des hinteren Fahrzeugbereiches. Im entstandenen Freiraum fand anschließend die Integration eines identischen, zweiten Fahrersitzes samt Pedalerie und Multifunktionslenkrad

statt (vgl. Abbildung 36). Die erhaltenen zwei Fahrerarbeitsplätze wurden zudem räumlich durch eine Trennwand voneinander separiert. Da diese einer verdunkelten Spiegelverglasung entspricht, kann nur der Fahrer von hinten nach vorn hindurch sehen, jedoch nicht der Fahrer von vorn nach hinten. Der somit verborgene Wizard kann daher nahezu unbemerkt als menschlicher Bioprozessor bzw. "Schwarzfahrer" agieren. Er sitzt mittig im hinteren Teil des Fahrzeugs (Abbildung 37) und kann dort über die verfügbare Aktuatorik (Gas, Bremse, Lenkung) in Interaktion mit dem eigentlichen Fahrer treten. Diesbezüglich ist auch eine Übernahme der kompletten Fahrzeugführung durch den Wizard möglich.



Abbildung 37: Wizard-of-Oz Versuchsfahrzeug der Volkswagen AG

Die technische Umsetzung dieser Kontrollübernahme wird erstens über die Ansteuerung der elektrischen Servolenkung gewährleistet. Zweitens haben sowohl der hintere als auch der vordere Fahrer ein serienmäßiges Gas-Pedal. Übernimmt dies der Schwarzfahrer wird das vordere Pedal vom Steuergerät abgetrennt und dafür das hintere über eine Relaisschaltung freigegeben. Drittens kann der Wizard mit seinem Bremspedal den Bremskraftverstärker ansteuern und eine Verzögerung auslösen. Alle genannten Fahrfunktionen werden dabei durch einen Mikrocontroller überwacht.

Die Nutzung von Lenkung, Gas und Bremse im Fahrbetrieb erfolgt über ein Bedienelement beim Schwarzfahrer. Auf diesem wird durch Umlegen entsprechender Schalter die Ansteuerung einzelner sowie aller Fahrfunktionen gleichzeitig gewährleistet (Abbildung 38).



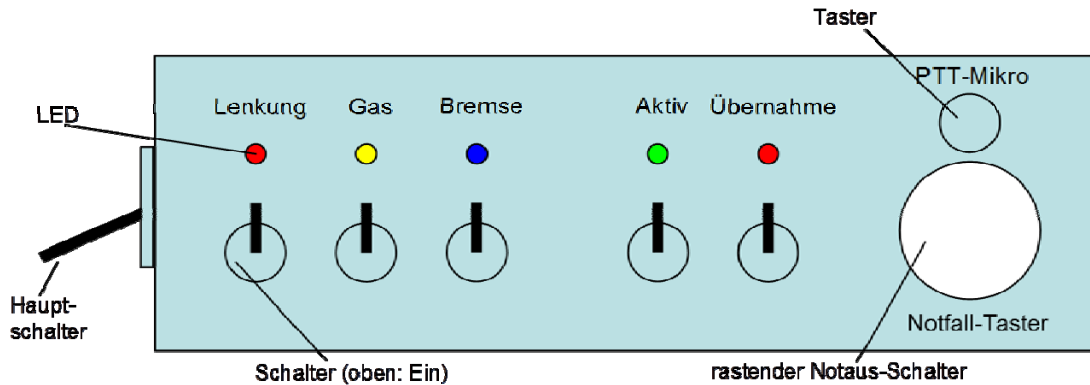


Abbildung 38: Bedienelements des Schwarzfahrers (Wizard)

Mit Hilfe der spezifisch gestalteten Schnittstelle in Abbildung 38 besteht im Versuchsfahrzeug somit die Möglichkeit, unterschiedliche Grade an Assistenz und Automation darzustellen. Zudem kann der Wizard die jeweilige Auslegung der Quer- und Längsführung eigenständig variieren bzw. versuchsbedingt anpassen. Das Antiblockiersystem und das Elektronisches Stabilitätsprogramm bleiben stets einsatzfähig.

Gleichfalls wurden im Versuchsfahrzeug Sicherheitsvorkehrungen getroffen, um den hohen Anforderungen an die Sicherheit im Straßenverkehr gerecht zu werden. So ist das maximale Stellmoment der Lenkung so bemessen, dass der vordere Fahrer den Schwarzfahrer immer "überstimmen" kann. Bezüglich der Bremsung wird zudem stets derjenige Fahrer priorisiert, der die stärkste Verzögerung einleitet. Als weiteres Merkmal des Versuchsträgers sind alle Funktionen auf dem Multifunktionslenkrad und den zugehörigen Lenkstockhebeln durch den vorderen und den hinteren Fahrer bedienbar. So können beispielsweise beide blinken, die Scheibenwischer aktivieren oder hupen. Außerdem besitzt der Wizard einen Tempomaten, der ihm die Geschwindigkeitshaltung während der Fahrt erleichtert. Sollte der Fall eintreten, dass der Schwarzfahrer die vorgetäuschte Situation auflösen muss, kann er mit Hilfe eines Notfall-Mikrofons (vgl. Abbildung 38) den Fahrer zur Übernahme der Fahrzeugkontrolle auffordern. Gleichfalls hat der vordere Fahrer einen Not-Aus-Taster, der beim Drücken mit einem kompletten Systemabwurf an ihn selbst einhergeht (vgl. Abbildung 38).

Die Kommunikation zwischen Fahrer und Wizard findet über ein Bedienelement statt, dass sich rechts neben dem Kombiinstrument in der Fahrerkabine befindet (Abbildung 39, rechts). Auf diesem kann der vordere Fahrer "das System" per Tastendruck ein- bzw. ausschalten. Voraussetzung dafür ist, dass die jeweilige Fahrfunktion verfügbar ist. Das heißt, der Schwarzfahrer muss zunächst die entsprechenden Systemzustände über die Schalter an seinem Bedienelement hergestellt (vgl. Abbildung 38 oder Abbildung 39, links) und an den vorderen Fahrer kommuniziert haben.

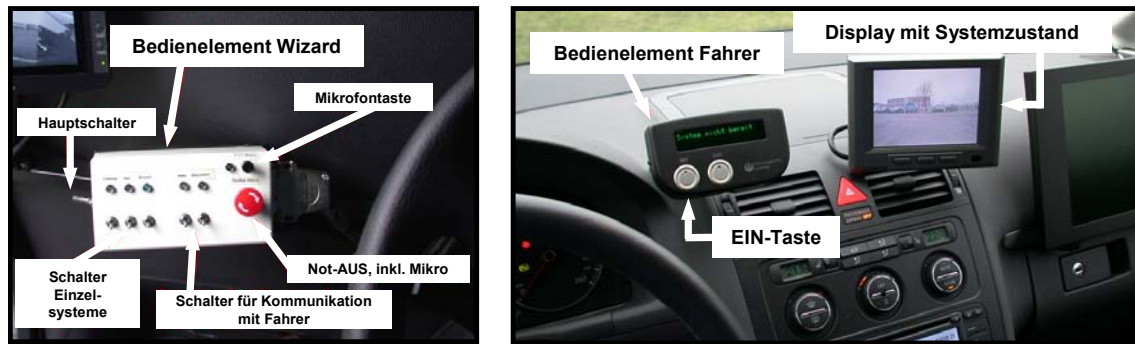


Abbildung 39: Bedienelemente des Schwarzfahrers (links) und des Fahrers vorn (rechts)

Jeder Wechsel des Systemzustands wird von einem akustischen Signal begleitet. Bei Übergängen in Richtung Automation signalisiert ein moderater Ton die Verfügbarkeit einer Fahrfunktion. Bei Übergängen in Richtung Fahrer fordern gleichfalls sanfte Hinweissignale zur Übernahme von Teilaufgaben der Fahraufgabe auf. Die Ausnahme bildet der vollständige Systemabwurf, der durch einen sehr lauten und hohen Ton charakterisiert ist. Der Schwarzfahrer kann diese Signale und alle sonstigen Geräusche aus der Fahrerkabine über eine akustische Rückkopplung nach hinten hören. Dies ist insbesondere für spezifische Instruktionen des Versuchsleiters bei der anfänglichen Erklärung des „technisch hoch komplexen Fahrzeugs“ und bei stichwortabhängigen Funktionsauslösungen während der Versuchsfahrt (z.B. Übernahmeaufforderungen) wichtig.

Um einen sicheren Fahrbetrieb zu gewährleisten, hat der Wizard weiterhin zwei Rückfahrmonitore und einen Rückspiegel zu Verfügung. Um zu verhindern, dass die Probanden den Wizard entdecken, ist die Zentralverriegelung für die hinteren Türen und die Heckklappe vom serienmäßigen Verschlößsystem entkoppelt. Dies betrifft ebenfalls die Steuerung der hinteren Seitenscheiben von vorn. Die Versuchsteilnehmer haben somit keine Möglichkeit, in den hinteren Teil des Tourans zu gelangen bzw. einen Blick hinein zu werfen.

Das Fahrzeug ist vom TÜV und der Unfallforschung der Volkswagen AG in seinen Funktionen geprüft und für den Straßenverkehr zugelassen worden. Da die Fahrzeugkontrolle hohe kognitive und motorische Anforderungen an den Wizard stellt (Bernsen et al., 1994), wird der Versuchsträger zudem nur von einem Testfahrer der Volkswagen AG gesteuert. Jener ist auf den VW Touran trainiert und minimiert somit die Varianz in der Darstellung einzelner Assistenzfunktionen über die Fahrversuche hinweg. Dennoch sind weitere Varianzquellen durch schwankende Umweltbedingungen oder durch die Interaktion des Probanden mit dem Wizard (gemeinsame Fahrzeugsteuerung) bei der Bewertung der erhaltenen Ergebnisse zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die Wizard-of-Oz Technik nie präziser als die Realität sein kann. Wie groß der Trade-off zwischen dem simulierten und

dem realen Systemsetup ist, sollte folglich über Evaluationen getestet werden. Dies ist auch beim vorliegenden Versuchsträger erfolgt.

### **Validierung des Wizard-of-Oz Fahrzeugs**

Bei der Evaluation eines derartigen Fahrzeugs ist prinzipiell die Frage zu beantworten, ob ein reales System überhaupt durch einen Menschen nachbildbar ist. Dabei geht es weniger darum, ob der Wizard die exakte Parametrierung der Fahrerassistenzfunktion darstellen kann (Buld, Hoffmann & Krüger, 2002). Entscheidendes Prüfkriterium ist eher die annähernde Deckungsgleichheit in den subjektiven Probandenurteilen zwischen Realsystem und WOz-System. Das heißt, die kognitive Systemrepräsentation sollte ähnlich bezüglich der wahrgenommenen kinästhetischen Eigenschaften der Funktion ausfallen. In diesem Zusammenhang ist anzunehmen, dass der Mensch infolge kognitiver, perzeptiver bzw. physikalischer Filterungsprozesse (vgl. Rumar, 1985; Goldstein, 2002; Schlag et al., 2008) die Genauigkeit zweier geringfügig voneinander differierenden ACC-Abstandsregelungen nicht 1:1 auflösen kann (Lange, 2007). Wichtiger ist hierbei eher, dass die Versuchspersonen die Simulation der Fahrerassistenzsysteme zu keinem Zeitpunkt der Interaktion in Frage stellen (Peissner, Heidmann & Ziegler, 2001). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass Systeme wie ACC oder ein Spurhalteassistent keine flächendeckende Marktdurchdringung aufweisen (Wyman, 2003; Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski, 2009). Folglich sind diese Funktionen für die Nutzer in ihrer konkreten Auslegung meist weniger bekannt.

Bezüglich des Wizard-of-Oz Fahrzeug wurde in zwei Studien durch Schmidt et al. (2008) geprüft, wie präzise und replizierbar der Wizard eine gewünschte Systemfunktionalität aus Sicht des Nutzers (Probanden) simulieren kann. Dabei zeigte sich in der Untersuchung eines Informationssystems für die Verkehrszeichenerkennung ( $N=18$ ) sowie eines Lane Keeping Assistance System ( $N=19$ ) das die subjektiven Probandenurteile annähernd deckungsgleich zwischen den Realsystemen und dem WOz-System ausfielen (Schmidt et al., 2008). Folglich befürworten die erhaltenen Bewertungsprofile die Eignung des Wizard-of-Oz Fahrzeugs für Akzeptanzuntersuchungen, welche die subjektive Beurteilung zukünftiger Systemauslegungen aus dem automobilen Umfeld zum Schwerpunkt haben. Zudem hat sich gezeigt, dass nahezu alle Probanden davon überzeugt sind, in einem technisch ausgerüsteten Fahrzeug zu sitzen. Bis auf eine Person kam keine der mittlerweile über 150 getesteten Versuchspersonen auf den Gedanken, dass sie von einem im Laderaum sitzenden Menschen gefahren werden. Die Erfahrung aus den Studien belegt, dass eine Hauptvoraussetzung für diese Glaubhaftigkeit die überzeugende technische Erläuterung des Fahrzeugs mit seinen Systemkomponenten ist. Allerdings bleibt eine wesentliche Einschränkung der Wizard-of-Oz

Methode bestehen: Der menschliche Wizard ist weniger gut geeignet, um aus Studien exakte Systemgrenzwerte oder eine genaue Funktionsparametrierung abzuleiten.

### **Umsetzung der Systemmodi der ersten Studie im Wizard-of-Oz Fahrzeug**

Das Wizard-of-Oz Fahrzeug der Volkswagen AG diente in der ersten Untersuchung der vorliegenden Arbeit somit als methodisches Werkzeug, um im Realverkehr den Umgang des Fahrers mit ausgewählten Transitionssituationen innerhalb eines vierstufigen Automationsansatzes zu analysieren. Analog zur betrachteten Bandbreite an Automation (vgl. Abbildung 34), wurden hierfür die Systemmodi „Fahrer selbst“, „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ vom Wizard zu simuliert. Der auf den VW Touran trainierte **Versuchsfahrer** musste also je nach Automatisierungsgrad des Systems die Fahrzeugführung teilweise oder vollständig über die erläuterte Schnittstelle zur Entkopplung der vorderen Fahrfunktionen übernehmen (vgl. Abbildung 38). Anschließend war der Wizard gefordert, die einzelnen Systemmodi realitätsnah abzubilden. Grundlage dieser spezifischen Systemauslegung im Versuchsfahrzeug stellten die im Kapitel 4 definierten Funktionsumfänge dar (vgl. Tabelle 4). Fuhr der Proband selbst, wurde ihm vom Wizard folglich auch keine Form der Assistenz angeboten. Bei den Fahrten mit ACC übernahm der Schwarzfahrer hingegen die Längsführung. Der Fahrer vorn hatte demnach noch die Aufgabe, das Fahrzeug zu lenken. Um ein konstantes Fahrtempo zu gewährleisten, nutzte der Wizard für die ACC-Simulation seinen Tempomaten. In Relation zum gewählten Anwendungskontext auf der Autobahn (vgl. Kapitel 4.2.3) lag dessen Geschwindigkeitsbegrenzung in dieser Studie bei maximal 130 km/h. Zur Darstellung der integrierten Fahrfunktionen „Assistent“ und „Pilot“ erhielt der Proband zusätzlich zum ACC eine Unterstützung unterschiedlicher Stärke in der Querführung (vgl. Tabelle 4). Beim Modus „Assistent“ reagierte der Schwarzfahrer folglich auf unbeabsichtigtes Annähern an die seitlichen Fahrspurmarkierungen mit einem zunehmenden Gegenlenkmoment in Richtung Fahrspurmitte. Beim Modus „Pilot“ simulierte er hingegen eine fahrspurzentrierte Spurführung, die den Probanden die Wegnahme der Hände vom Lenkrad ermöglichte. Abbildung 40 stellt die wizardseitig **nachgebildeten Regelungsalgorithmen** für diese Spurhaltung schematisch dar. Deren standardisierte Umsetzung im Versuch, inklusive der einheitlichen Nachbildung des Modus „ACC“ wurde durch umfassende Trainingseinheiten gewährleistet, die im Vorlauf der ersten Studie auf der geplanten Versuchsstrecke erfolgten (vgl. Kapitel 5.3.4).

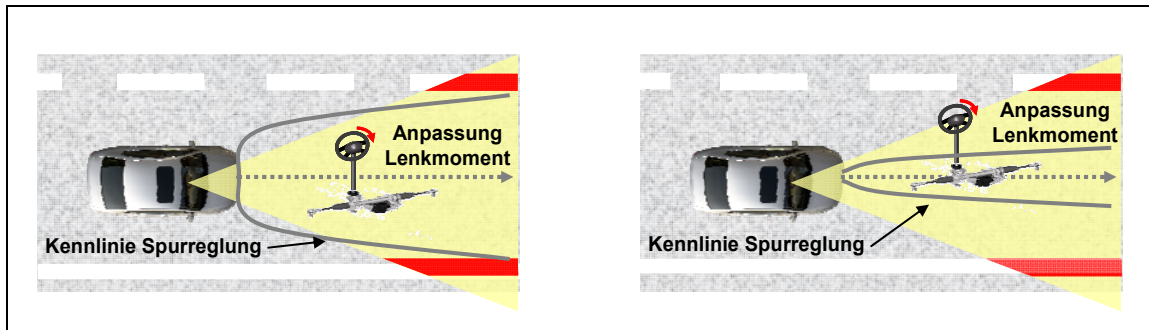


Abbildung 40: Wizardseitig nachgebildete Regelungsalgorithmen für die Spurhaltungsvarianten der Modi „Assistent“ (links) und „Pilot“ (rechts)

Begleitend zur Übernahme einzelner Fahrfunktionen durch den Schwarzfahrer, erhielt der Proband in der ersten Studie eine visuelle Anzeige über den jeweils aktuellen Systemzustand. Hierfür wurde ein Display (7 Zoll TFT-Monitor) genutzt, dass sich über den Lüftungsgittern im Mittelkonsolenbereich der Fahrerkabine befand (vgl. Abbildung 39, rechts). Jenes war sowohl aus der Fahrerperspektive als auch für den Wizard gut sichtbar.

Damit sich der Schwarzfahrer auf die Simulation der Aktuatorik konzentrieren konnte, erfolgte die Darstellung der entsprechenden Systemzustandsanzeigen durch einen Versuchsleiter auf dem Beifahrersitz. Jener betätigte hierfür eine Laptastatur mit Tasten für die jeweilige Systemzustandsanzeige der vier Modi. Der Testleiter hatte dabei die Aufgabe, die Auslösung der einzelnen Anzeigen möglichst verdeckt durchzuführen, um die Interaktion der Probanden mit dem Fahrzeug realistischer wirken zu lassen.

Die grafischen **Darstellungen der Systemzustände** können grundsätzlich in drei Kategorien gruppiert werden:

- Systemangebote
- Übernahmeaufforderungen
- Systemmodus

Die zugehörigen Anzeigen sind in Abbildung 41 illustriert, wobei sich die Modi „Assistent“ und „Pilot“ nur in der Visualisierung der Querführungsunterstützung unterschieden. Die Darstellungen werden im Folgenden näher erläutert. Die Erklärung deren Reihenfolge im eigentlichen Fahrversuch findet sich hingegen im Kapitel 5.3.6.

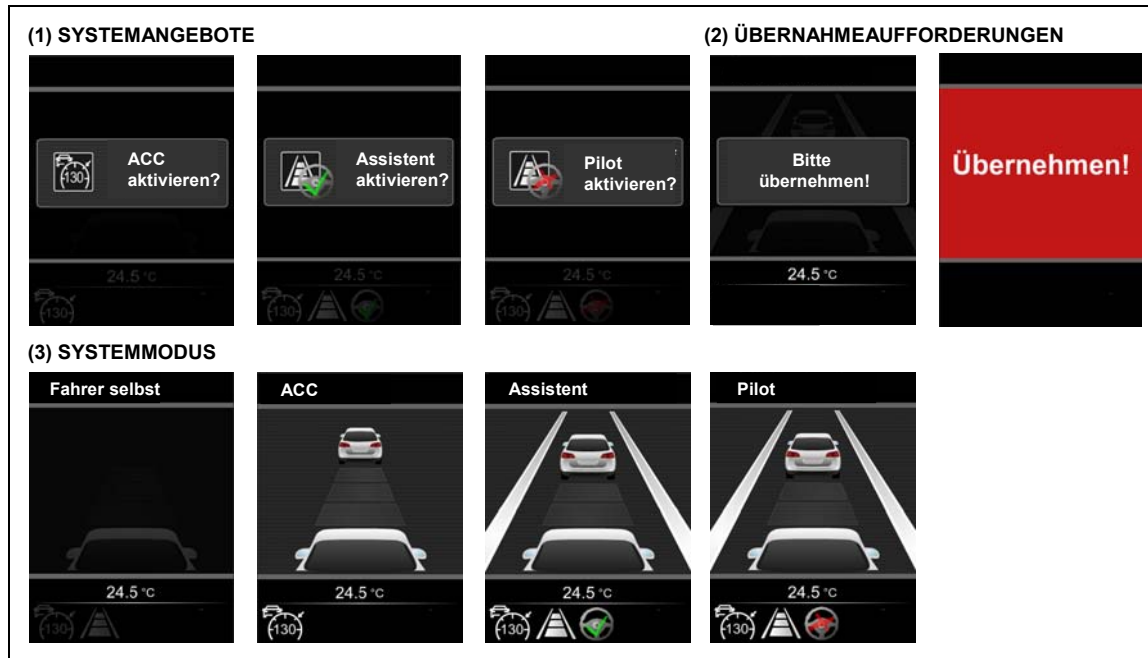


Abbildung 41: Systemzustandsanzeigen der ersten Studie

In der Studie konnte die Aktivierung der Automatisierungsgrade erst nach einem fahrzeugseitig initiierten Systemangebot stattfinden (vgl. Abbildung 41). Analog zu derzeitigen Seriensystemen wurde dem Fahrzeugführer somit die prinzipielle Verfügbarkeit einer Fahrfunktion angezeigt. Zusätzlich erhielten die Probanden einen moderaten Ton als Hinweissignal.

Nachdem sich ein Systemmodus „bereit“ gemeldet hatte, konnte die Testperson das jeweilige System mit der „EIN-Taste“ auf dem entsprechenden Bedienkästchen (Abbildung 39, rechts) aktivieren. Der Schwarzfahrer simulierte daraufhin die funktionsspezifische Aktuatorik. Der Versuchsleiter schaltete synchron die zugehörige Systemmodusanzeige hinzu (Abbildung 41). Analog zum jeweiligen Funktionsumfang visualisierte das Display hierbei, welche Art der Unterstützung der Fahrer erhielt. So wurde beim Systemmodus „Pilot“ beispielsweise angezeigt, dass die Längs- und Querverführung fahrzeugseitig bis 130 km/h übernommen ist sowie der Fahrer nicht mehr aktiv lenken muss (vgl. Abbildung 41).

Im Fall einer Kontrollverschiebung in Richtung Fahrer (Übernahmeaufforderung) erhielten die Probanden im Fahrversuch zwei verschiedene Anzeigen, die mit der Art der Transition korreliert waren (vgl. Abbildung 41). Eine moderate Meldung („Bitte Übernehmen!“) erfolgte bei indirekten Übergängen auf Zwischenstufen der Automation. Der Fahrer teilte sich hierbei die Fahrzeugführung noch mit dem Wizard. Die rot gestaltete Übernahmeaufforderung (vgl. Abbildung 41) wurde hingegen zugeschaltet, wenn eine vollständige Rückgabe der Fahrzeugkontrolle auf den Modus „Fahrer selbst“ stattfand. Ein sehr lauter und hoher Ton begleitete jene Veränderung des Systemzustandes.

Das folgende Kapitel widmet sich der Beschreibung der zugehörigen Versuchsstrecke.

#### **5.3.4 Versuchsstrecke**

Als Teststrecke wurde die **A9 von München nach Ingolstadt** gewählt. Diesbezüglich ist zu erwähnen, dass sich das Wizard-of-Oz Fahrzeug im Testzeitraum der Realfahrtstudie parallel im Einsatz bei Stauversuchen rund um München befand. Die damit einhergehende Vorerfahrung mit automatisierten Systemen ist bei der Ergebnisanalyse zu berücksichtigen.

Die definierte Strecke der ersten Studie umfasste ca. 60 km. Sie begann auf einem Parkplatz vor der Autobahnabfahrt 69 bei Eching und endete nahe Ingolstadt an der Ausfahrt „Lenting“ (vgl. Abbildung 42). Da die A9 vornehmlich 3-streifige Autobahnabschnitte in Fahrtrichtung aufweist, bestand im Testzeitraum überwiegend eine Richtgeschwindigkeit von 130 km/h. Unter Berücksichtigung von Baustellen und Geschwindigkeitsbeschränkungen betrug die gesamte Fahrtzeit bis Ingolstadt annähernd eine Stunde. Die Strecke wurde in zwei **Zeiträumen** abgefahren und ermöglichte die Testung von je zwei Probanden pro Tag:

- 09:30 Uhr bis 10:30 Uhr
- 17:30 Uhr bis 18:30 Uhr

Das durchschnittliche **Verkehrsaufkommen** für den betreffenden Autobahnabschnitt ist mit 70.000 bis < 100.000 Fahrzeuge pro Tag anzugeben (Verkehrsmengenkarte 2005 nach Scholl, 2009). Dies entspricht einer mittleren Verkehrsstärke. Für die betreffende Tageszeit der Versuche gewährleistete der Verkehrsfluss eine relativ freie sowie durchgängige Durchfahrt und somit einen reibungslosen Testablauf.

Die genaue Dokumentation der Versuchsstrecke vor der eigentlichen Untersuchung führte zu einer **systematische Festlegung von Streckenpunkten**, an denen sich die in Kapitel 5.3.2 beschriebenen Transitionen ereigneten. Wesentlich war dabei, dass diese ausreichend Raum für die Systemnutzung sowie dazwischen liegende Befragungen ließen. In Abbildung 42 finden sich alle transitionsrelevanten Streckenpunkte der ersten Studie wieder. Sie sind mit einem schwarzen Kreis hervorgehoben und nummeriert.

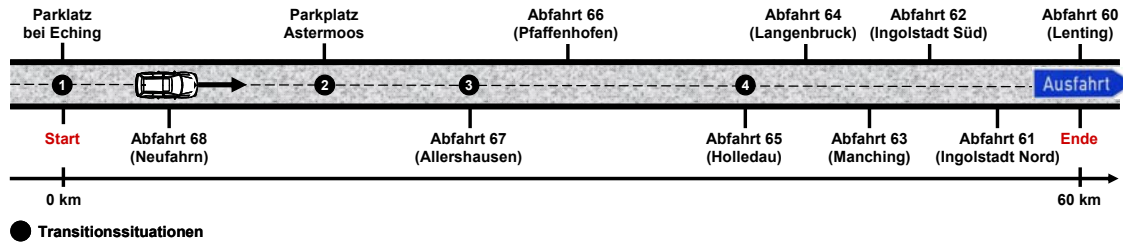


Abbildung 42: Transitionsrelevante Streckenpunkte der ersten Studie in Fahrtverlauf von Eching bis Lenting (A9)

Welche Übergänge sich an den markierten Stellen in Abbildung 42 ereigneten, wird im Abschnitt 5.3.6 näher beschrieben. Im folgenden Kapitel 5.3.5 finden sich zuvor Erläuterungen zum Versuchsdesign der Realfahrtuntersuchung.

### 5.3.5 Versuchsplan

Wie aus der Abbildung 35 hervorgeht, integriert die erste Studie Übergänge, die in **Richtung Automation** Verschiebungen der Fahrzeugkontrolle vom Fahrer auf den Systemmodus „Assistent“ oder „Pilot“ betrafen. Diesbezüglich interessierte, ob jene Aktivierungen von unterschiedlich hohen Automatisierungsgraden Auswirkungen auf das Verhalten und die Bewertungen der Probanden haben. Zudem sollte analysiert werden, ob die Art der Transition (direkt vs. indirekt) Effekte in den erhobenen Daten zeigt.

Weiterhin wurden in der Untersuchung Transitionen eingebunden, die aus dem Systemmodus „Assistent“ oder „Pilot“ mit direkten und indirekten Übergängen in **Richtung Fahrer** einhergingen (vgl. Abbildung 35). Im Unterschied zu den Use Cases der Systemaktivierung waren die indirekten Fälle hier mit einem Übergang auf den Zwischenmodus „ACC“ verbunden. Analog zu den Transitionen in Richtung Automation, interessierten gleichfalls die Auswirkungen des Grads der Kontrollverschiebung auf die Mode Awareness.

Unter Berücksichtigung der erläuterten Punkte, lag der Realfahrtstudie ein Versuchsdesign zugrunde, welches sowohl in Richtung Automation als auch in Richtung Fahrer zwei Faktoren als unabhängige Variable variierte (vgl. Abbildung 43). Der Faktor A bezog sich auf den „**Grad der Kontrollverschiebung**“, der in der vorliegenden Arbeit über Transitionen von „Fahrer selbst“ auf die Modi „Assistent“ (A1) und „Pilot“ (A2) repräsentiert wurde (vgl. Abbildung 43). In Richtung Fahrer betraf dies den umgekehrten Fall. Der Faktor B beinhaltete hingegen das Transitionsmerkmal „**Indirekte Transition**“ (vgl. Abbildung 43). Folglich wurde die Art der Transition in B1 „direkt“ und B2 „indirekt“ unterteilt. Bezüglich der „**Richtung der Transition**“ ist erneut darauf hinzuweisen, dass dieses Merkmal zwar Bestandteil der Arbeit und damit der Versuchsplanung ist, jedoch keine systematische Einbindung als Faktor erfolgte (vgl. Kapitel 5.2).



Transition in Richtung Automation

		Faktor A: „Grad der Kontrollverschiebung“	
		A1 "Assistent"	A2 "Pilot"
Faktor B „Art der Transition“	B1 „direkt“	Y <sub>11</sub>	Y <sub>21</sub>
	B2 „indirekt“	Y <sub>12</sub>	Y <sub>22</sub>

Transition in Richtung Fahrer

		Faktor A: „Grad der Kontrollverschiebung“	
		A1 "Assistent"	A2 "Pilot"
Faktor B „Art der Transition“	B1 „direkt“	Y <sub>11</sub>	Y <sub>21</sub>
	B2 „indirekt“	Y <sub>12</sub>	Y <sub>22</sub>

Abbildung 43: Versuchsplan der ersten Studie, getrennt für die Richtung der Transition

Die Übertragung des Versuchsplans aus Abbildung 43 in den Versuchsablauf erläutert das folgende Kapitel. Hierfür wird gleichfalls Bezug zur Abbildung 42 genommen.

### 5.3.6 Versuchsablauf

Alle Probanden fuhren bei Versuchsbeginn zunächst selbstständig vom Parkplatz auf die Autobahn A9. Folglich befanden sie sich zunächst im Modus „Fahrer selbst“ (FS). Die Testpersonen wurden hierbei von einem Versuchsleiter als Beifahrer begleitet. Dieser hatte ihnen vorab eine kurze Erläuterung zum Untersuchungsablauf und -anlass gegeben sowie die einzelnen Systemzustandsanzeigen (vgl. Abbildung 41) erklärt. Zudem wies er die Probanden daraufhin, dass sie während der Fahrt möglichst selbstständig im Fahrzeug agieren sollen und er nur bei Bedarf eingreift. Diese Instruktion hatte den Hintergrund, potentielle Versuchsleitereffekte möglichst gering zu halten. Nachdem die Probanden alle Fragen zum Untersuchungsablauf klären konnten, folgten sie einem vorausfahrenden Begleitfahrzeug auf die A9. Jenes diente zur besseren Orientierung sowie zur Gewährleistung der Sicherheit während der relativ anspruchsvollen Fahrt. Das Begleitfahrzeug wechselt nach Auffahrt auf die Autobahn auf den dritten Fahrstreifen, da nur auf diesem eine freie Fahrt bis zur Abfahrt bei Lenting möglich war (vgl. Abbildung 42). Das Fahrzeug fuhr zudem nicht schneller als die festgelegte Maximalgeschwindigkeit von 130 km/h.

Sobald sich die Testpersonen auf der relevanten Fahrspur befanden, löste der Versuchsleiter die **erste Transition** (Systemangebot) per Tastendruck aus. Diesbezüglich ist anzumerken, dass die Probanden vor Versuchsbeginn auf zwei Gruppen (G1, G2) randomisiert verteilt wurden (vgl. Abbildung 44). Jene Zuordnung legte fest, welcher Systemmodus den Versuchspersonen nach Auffahrt auf die A9 als erstes angeboten wird. Sie bestimmte folglich den **„Grad der Kontrollverschiebung“ in Richtung Automation**. Analog zur Abbildung 43 konnte demgemäß entweder die Aktivierung des Modus „Assistent“ oder des Modus

„Pilot“ erfolgen. Die Abbildung 44 stellt diese Übertragung des Versuchsplan in den Untersuchungsablauf nochmals grafisch dar (vgl. 1. Transition in Abbildung 44). Die weiteren Versuchsabschnitte mit definierter Abfolge der Transitionen werden im Folgenden erläutert.

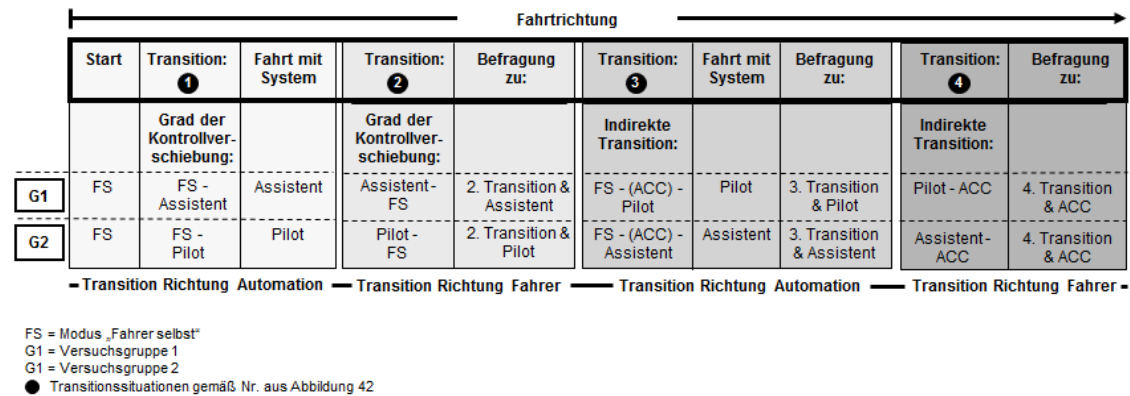


Abbildung 44: Abfolge der Transitionen über den Fahrtverlauf (vgl. Abbildung 42)

Nach der Bestätigung des Systemangebots über die EIN-Taste am Bedienkästchen des Fahrers (vgl. Abbildung 39) fuhren die Testpersonen ca. acht Minuten in dem jeweiligen Fahrmodus. Im Anschluss daran triggerte der Versuchsleiter am Parkplatz Astermos (vgl. Abbildung 42) verdeckt die **zweite Transition**, welche mit einer **Kontrollverschiebung aus „Pilot“ oder „Assistent“ in Richtung Fahrer** verbunden war (vgl. Abbildung 44). Der Schwarzfahrer generierte analog dazu einen vollständigen Systemabwurf. Die Probanden mussten somit unabhängig vom Modus die Quer- und Längsführung wieder komplett übernehmen. Infolge des unterschiedlichen Automatisierungsgrads zwischen den beiden Fahrmodi hatten die „Pilot-Fahrer“ vor der Transition jedoch die Hände zumeist nicht am Lenkrad. Damit den Probanden ausreichend Zeit zur Verfügung stand, um sich über diese veränderte Situation bewusst zu werden, wartete der Versuchsleiter ca. zwei Minuten nach der Transition mit der anschließenden Nachbefragung (vgl. Abbildung 44). Jene beinhaltete die fahrerseitige Bewertung der erlebten Transition sowie des gefahrenen Automatisierungsgrads (vgl. Anhang).

Nach der Befragung hatten die Testpersonen bei der **dritten Transition** die Möglichkeit, spiegelbildlich zur Startfunktion den Modus „Assistent“ bzw. „Pilot“ zu aktivieren (vgl. Abbildung 44). Für die Einschaltung der jeweiligen Funktion variierte die **Art der Transition**. Der jeweilige Modus konnte somit entweder **direkt** oder **indirekt** über die Zwischenstufe „ACC“ aktiviert werden (Abbildung 44). Die Verteilung der Versuchspersonen auf diese beiden Optionen fand in randomisierter Form statt. Nachdem die Probanden ca. acht Minuten im Modus „Pilot“ bzw. „Assistent“ gefahren sind, erhielten sie wiederum einige Fragen zum System sowie zum dritten Übergang.

Auf Höhe des Dreiecks Holledau (vgl. Abbildung 42) folgte schließlich die **vierte Transition**. Bei dieser fand eine **indirekte Transition** auf den Modus „ACC“ statt (Abbildung 44). Die Fahrer mussten hierbei verstehen, dass das Fahrzeug die Querführung nicht mehr gewährleisten kann. Eine derartige Situation ist beim Wegfall einer oder beider Fahrspurmarkierungen wegen fehlender Kennzeichnungen denkbar. Die ACC Funktionalität wäre hiervon nicht beeinträchtigt und könnte dem Fahrer aus Komfortgründen direkt erhalten bleiben. Den Anschluss an jene Versuchsphase bildete wiederum eine Befragung zur Transition und zum Modus „ACC“.

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die zugehörige Stichprobe der ersten Studie.

### 5.3.7 Stichprobe

Die Stichprobe der ersten Untersuchung setzte sich aus 20 Versuchspersonen (9 ♀, 11 ♂) zusammen. Die Teilnehmer waren Mitarbeiter der AUDI Aktiengesellschaft (AG) und kamen vorwiegend aus der technischen Entwicklung. Teilweise gehörten sie auch den Bereichen Qualitätssicherung, Organisation oder Vertrieb und Marketing an. Sie wurden über den Probandenpool der AUDI AG elektronisch rekrutiert. Die Unterstützung bei der Studie erfolgte auf freiwilliger Basis und außerhalb der Arbeitszeit. Die Testpersonen konnten sich als Dankeschön für ihre Teilnahme ein Geschenk in Höhe des investierten Aufwands aussuchen.

Das **Alter** der weiblichen Probanden betrug im Durchschnitt 33 Jahre ( $SD = 10,17$ ), wobei das Minimum bei 21 Jahren und das Maximum bei 47 Jahren lag. Bei den Männern streute das Alter hingegen zwischen 24 und 53 Jahren ( $M = 37,64$ ;  $SD = 10,60$ ).

Die durchschnittliche **Fahrleistung** aller Versuchspersonen umfasste 25.800 km pro Jahr ( $SD = 14.084,71$ ). 11 der 20 Probanden (55 %) können hierbei als Vielfahrer ( $>20.000$  km/Jahr nach Fastenmeier, 1995) klassifiziert werden. In Bezug auf die Jahresfahrleistung wurden anteilig 27,8 % auf der Landstraße, 28,4 % in der Stadt und 43,8 % auf der Autobahn zurückgelegt. Die Fahrleistungsparameter der Stichprobe decken sich demnach mit der Nutzergruppe derzeit auf dem Markt befindlicher Fahrerassistenzsysteme. Zudem gehen sie mit den, seitens der Systementwickler angedachten Einsatzbereichen der Fahrfunktionen einher (Mühlbacher, 2003; Simon, 2000).

Allerdings zeigte die Erfahrung der Probanden im **Umgang mit Fahrerassistenzsystemen** im privaten Bereich ein relativierendes Bild. So ergab sich bei der Befragung bezüglich des

Vorhandenseins ausgewählter Assistenzsysteme und deren Nutzungshäufigkeit im eigenen Fahrzeug folgende Verteilung (Tabelle 18).

Tabelle 18: Vorhandensein und Nutzungshäufigkeit ausgewählter FAS im Privatfahrzeug

„Haben Sie mit den folgenden FAS Erfahrungen aus Ihrem Privatfahrzeug?“	Tempomat	ACC	Lane Departure Warning	Heading Control
<b>ja</b>	60 %	10 %	10 %	0 %
<b>nein</b>	40 %	90 %	90 %	100%
„Wie häufig nutzen Sie diese FAS?“	Tempomat	ACC	Lane Departure Warning	Heading Control
<b>oft</b>	25 %	-	-	-
<b>gelegentlich</b>	-	10 %	10 %	-
<b>nie</b>	35 %	-	-	-

Die Erfahrung der Versuchsteilnehmer mit derzeit in Serie befindlichen Fahrerassistenzsystemen ist also eher als gering einzustufen. Ob eines der Systeme im Privatfahrzeug genutzt wird, war laut U-Tests nach Mann und Whitney zudem unabhängig vom Geschlecht (vgl. Anhang). Bei der Interpretation der Ergebnisse der ersten Studie muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Probanden vor der Versuchsfahrt in Richtung Ingolstadt an einer anderen Untersuchung zum automatisierten Fahren teilgenommen hatten (vgl. Kapitel 5.3.4). Da die hierbei erlebten Systemen eine quer- und längsgeregelte Fahrt durch Staus ermöglichten, eigneten sich die Testpersonen folglich ein Basiswissen zum Umgang mit integrierten Funktionsauslegungen an. Im konkreten Fall betraf dies das Kennenlernen eines Systems, dass bis zu 60 km/h hochautomatisch fährt, keine Fahrstreifenwechsel macht und bei dem Systemfehler möglich sind. Durch die Interaktion mit dem Fahrzeug wurde somit ein rudimentäres, mentales Systemwissensmodell aufgebaut, dessen Bausteine sich auf die Bedienung, auf das Verhalten und auf Zustände der Funktion beziehen. Diese gesammelten Erfahrungen könnten in der Realfahrtuntersuchung der vorliegenden Arbeit auf ähnliche Situationen oder Funktionen transferiert werden. Demnach ist anzunehmen, dass konzeptgesteuerte Datenverarbeitungsvorgänge (top-down) Einfluss auf das Verhalten, die Entscheidungen und die Bewertungen der Probanden hatten.

Weitere Analysen der subjektiven Daten aus der Vorbefragung der ersten Studie ergaben, dass die AUDI Mitarbeiter eine erhöhte Technikaffinität aufwiesen. Diese wurde anhand des Persönlichkeitsfragebogens von Beier (2004) zu **Kontrollüberzeugungen im Umgang mit Technik** (KUT) operationalisiert. Die hierfür verwendete Kurzform besteht aus acht Items und erfasst vorwiegend die internalen Kontrollüberzeugungen einer Person (vgl. Anhang). Über eine hohe Ausprägung dieser verfügen nach Beier (2004) zum Beispiel

Personen, welche die Bewältigung technischer Probleme als Folge des eigenen Handelns wahrnehmen (vgl. Rotter, 1966; Lefcourt, 1982; Wallston, 2001). Das damit einhergehende Vertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit hat laut Autor ebenso einen Effekt auf die Einstellung zu Automatisierung. In einer Untersuchung zum Zusammenhang von KUT mit der Präferenz verschiedener Automatisierungsgrade konnte Beier (2004) beobachten, dass Personen mit einem hohen Vertrauen generell eine positivere Einstellung zur Automatisierung haben. Sie wünschen sich allerdings keine komplette Ersetzung, sondern bevorzugen informierende, mit dem Nutzer interagierende Systeme.

Die Verteilung der Kontrollüberzeugungen im Umgang mit Technik innerhalb der Stichprobe der ersten Studie ist in Abbildung 45 in Form eines Boxplots dargestellt. Sie wurde nach Umcodierung der vier negativ gepolten Items des Fragebogens (vgl. Anhang) mittels Aufsummierung einzelner Antworten bestimmt. Die Skalierung der Ordinate in Abbildung 45 korreliert hierbei mit dem Wertebereich des KUT-Fragebogens, der nach Addition der Itemwerte von „1“ („stimmt gar nicht“) bis „5“ („stimmt völlig“) minimal acht und maximal 40 Punkte umfasst. Je niedriger der KUT-Gesamtwert der Probanden war, desto geringer fiel demgemäß deren Kontrollüberzeugungen im Umgang mit Technik aus. Im vorliegenden Fall lag der Median der Verteilung innerhalb der Stichprobe bei 33, das Minimum bei 22 und das Maximum bei 40 Punkten (vgl. Abbildung 45, links). Es ergab sich demnach eine systematische Verschiebung der KUT-Werte in Form eines Deckeneffekts.

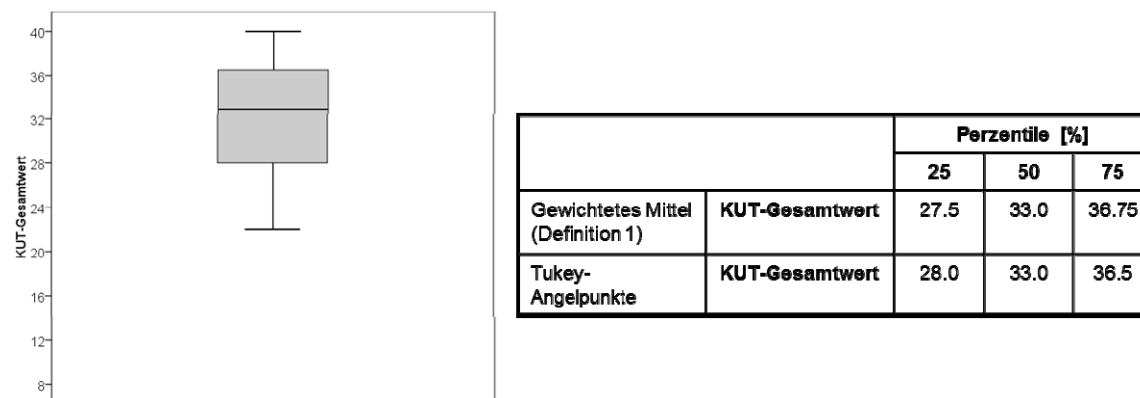


Abbildung 45: Verteilung des KUT-Gesamtwertes innerhalb der Stichprobe der ersten Studie (links), inklusive 25 %, 50 %, 75 % Perzentil (rechts)

Für die vorliegende Arbeit wurde zudem mittels Perzentilberechnung geprüft, wie sich die Testpersonen über einzelne KUT Gruppen (niedrig: 25 % Perzentil; mittel: 50 % Perzentil; hoch: 75 % Perzentil) sowie Geschlechter verteilen. Demgemäß konnte keine eindeutige Trennung der Probanden in die drei Gruppen erfolgen. Es wurde nur ein signifikanter Unterschied in den KUT-Werte zwischen Frauen und Männer festgestellt ( $U(-2,59) = 15.50$ ;

$p = .010$ ). Infolge der ungleichmäßig verteilten KUT-Werte wird das Kriterium nicht in die weiteren statistischen Analysen (z.B. als Moderatorvariable) einbezogen.

Neben den bereits genannten soziodemografischen Angaben, wurden gleichfalls Daten zum **subjektiven Befinden** erfragt. Dies erfolgte vor und nach jeder Versuchsfahrt. Basis war eine modifizierte Form des Swedish Occupational Fatigue Inventory (SOFI, vgl. Anhang). Der ursprüngliche Fragebogen enthält fünf Faktoren, deren zugehörige fünf Items durch verbale Beschreibungen repräsentiert sind (Åhsberg, Gamberale & Kjellberg, 1997):

- Lack of energy (Allgemeine Erschöpfung)
- Physical exertion (Körperliche Angestrengtheit)
- Physical discomfort (körperliche Beschwerden)
- Lack of Motivation (Motivationsverlust)
- Sleepiness (Schläfrigkeit)

Die Antworten können auf einer Skala von 0 („trifft gar nicht zu“) bis 6 („trifft sehr stark zu“) abgegeben werden (Åhsberg & Gamberale, 1998). Für den vorliegenden Versuch erfolgte allerdings eine Anpassung des Skalenbereichs auf 1 („trifft gar nicht zu“) bis 5 („trifft völlig zu“). Die ungerade Anzahl der Skalenstufen wurde somit um zwei reduziert und die Ankerpunkte mit Bezug zur Notenskala abgeändert. Die Gründe hierfür lagen primär darin, den Probanden die Einschätzung des subjektiven Befindens anhand konkreter Zahlenwerte zu erleichtern. Zu differenzierte Ratingskalen können das Urteilsvermögen der Testpersonen überfordern (Bortz & Döring, 1995; Mummendey, 2003). Für die inferenzstatistische Auswertung wurden zudem nur die Faktoren „Allgemeine Erschöpfung“, „Motivationsverlust“ und „Schläfrigkeit“ genauer betrachtet. Die beiden anderen Faktoren finden eher bei reinen Müdigkeitsfragestellungen im klinischen Bereich mit multidimensionalen Erhebungsansprüchen Verwendung.

Die Analyse der gewonnen Daten ergab, dass die Versuchspersonen vor Untersuchungsbeginn kaum erschöpft oder schläfrig, jedoch hoch motiviert waren (vgl. Anhang). Nach Ende der Versuchsfahrt zeigten sich zudem keine signifikanten Veränderungen im Befinden bezüglich der Skalen „Motivationsverlust“ ( $T[18] = 0.38$ ;  $p = .707$ ) und „Allgemeine Erschöpfung“ ( $T[18] = -0.84$ ;  $p = .413$ ). Eine Zunahme der Schläfrigkeit konnte allerdings dokumentiert werden ( $T[17] = -2.25$ ;  $p = .038$ ). Die Differenz zwischen Prä- und Postmessung ist jedoch vernachlässigbar gering.

Der nächste Abschnitt erläutert die weitere Datenbasis der Realfahrtstudie, welche zur Analyse der Fragestellungen diene. Die Ergebnisdarstellung folgt im Kapitel 5.5.

## 5.4 Datenbasis

In diesem Kapitel finden sich in den nachfolgenden Abschnitten Erläuterungen zu den erfassten Videodaten (Kapitel 5.4.1), Fahrdaten (Kapitel 5.4.2), Fragebogendaten (Kapitel 5.4.3) sowie Versuchsleiterprotokollen (Kapitel 5.4.4). Jene werden im Kapitel 5.4.5 nochmals zusammenfassend dargestellt.

### 5.4.1 Videodaten

Zur Aufnahme des Fahrerverhaltens befanden sich drei Farbkameras (CG-321PA1V) von der Firma Fujitsu im Versuchsfahrzeug (PAL TV-System). Diese waren zum einen an den beiden A-Säulen mit Ausrichtung auf den Probanden angebracht. Zum anderen fokussierten sie vom Fahrzeughimmel aus die Straße (Abbildung 46). Unter Berücksichtigung der Fahrdauer von ca. einer Stunde (vgl. Kapitel 5.3.4) und des hiermit benötigten Speicherbedarfs wurde nur mit 10 Frames pro Sekunde aufgezeichnet (Bildauflösung: 640 x 480 Pixel). Zur Sicherung der Daten erfolgte zudem die Festlegung einer Splittingrate, die mit einer Zwischenspeicherung des Videomaterials aller sieben Minuten einherging. Die Aufnahme der Videodaten fand mit Hilfe einer Software der Audi Electronics Venture GmbH statt. Das so genannte „Automotive Data and Time Triggered Framework“ (ADTF) befand sich rechts neben dem Schwarzfahrer und stand diesem auf einem Laptop zur Verfügung (Abbildung 46). Der Wizard war für das Starten und Beenden des ADTF während des Versuchs zuständig.

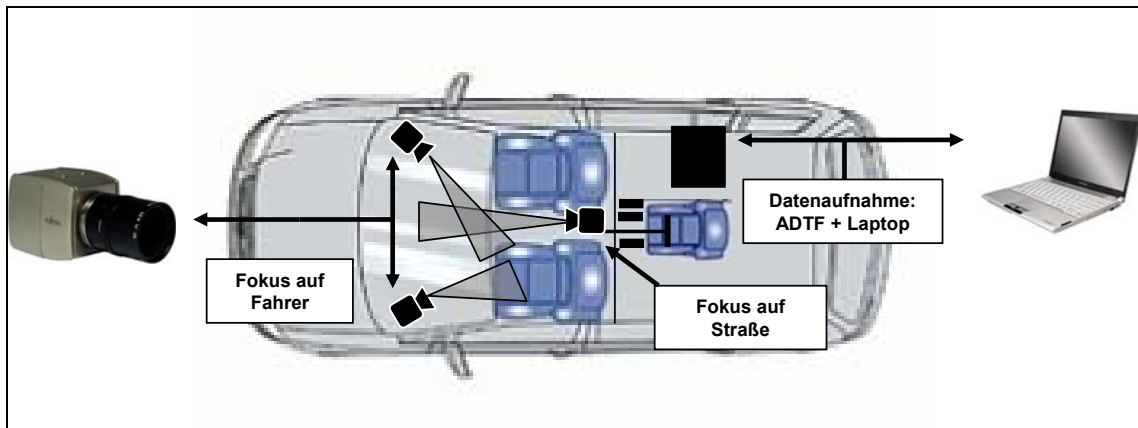


Abbildung 46: Platzierung der Messtechnik im Versuchsfahrzeug

Für die Auswertung des Videomaterials musste dieses zunächst mit Hilfe des Programms „DatExporter“ aus den generierten Datenfiles des ADTF extrahiert werden. Dies lag daran, dass die verwendete Software sowohl Video- als auch Fahrzeugdaten zeitsynchron in einer Datei abspeicherte. Die separierten Videostreams lagen im Anschluss an den Datenexport im Format AVI (Audio Video Interleave) vor. Sie dienten in der ersten Studie dazu, das Verhalten der Probanden auf Übergabe- bzw. Übernahmeaufforderungen zu dokumentieren.

Auf diese Weise ergab sich zum einen die Möglichkeit, mit Hilfe der Videoausschnitte die Reaktionszeiten aus den geloggten Fahrdaten (vgl. Kapitel 5.4.2) zu verifizieren bzw. zu korrigieren. Zum anderen konnte gleichzeitig das Blickverhalten der Versuchspersonen analysiert und Auffälligkeiten identifiziert werden. In Analogie zu Forschungsarbeiten zur Ablenkungswirkung von fahrzeuginternen Informationen, lag diesbezüglich die Annahme zugrunde, dass nicht transparente oder unerwartete Übergänge mit einem charakteristischen Blickverhalten auf die Systemmodusanzeige einhergehen (vgl. Rockwell, 1988; Toaka, 1990; Wierwille, 1992; Bruckmayr & Reker, 1994; Tijerina, 2000). Derartige, erwartungsinkonforme Transitionen sollten demnach von einer höheren Blickanzahl und Blickdauer auf die Systemzustandsanzeige begleitet sein (Cohen, 1998; Theofanou, 2002). Für Wierwille (1992) gelten hierbei Einzelblickdauern von über 1,5 s bereits als kritisch. Ergänzt man diese Erkenntnisse mit denen von Zwahlen, Adams und DeBald (1988), liegen immer dann gut verständliche Anzeigeninhalte vor, wenn diese nicht mehr als drei Blickzuwendungen von jeweils max. 1,2 s erfordern (vgl. Abbildung 47 sowie Bruckmayr & Reker, 1994). Die Blickdauer auf die Systemanzeige sollte jedoch pro Blick abnehmen und beim dritten Hinschauen nicht länger als 0,9 s dauern (vgl. Abbildung 47). Sind mehr als drei Blicke notwendig, sinken laut den Autoren die im Arbeitsgedächtnis gespeicherten Informationen über die aktuelle Verkehrssituation auf ein nicht-adäquates Niveau. Sie gehen folglich mit einer Abnahme an Situation Awareness einher (vgl. Kapitel 3.2.1).



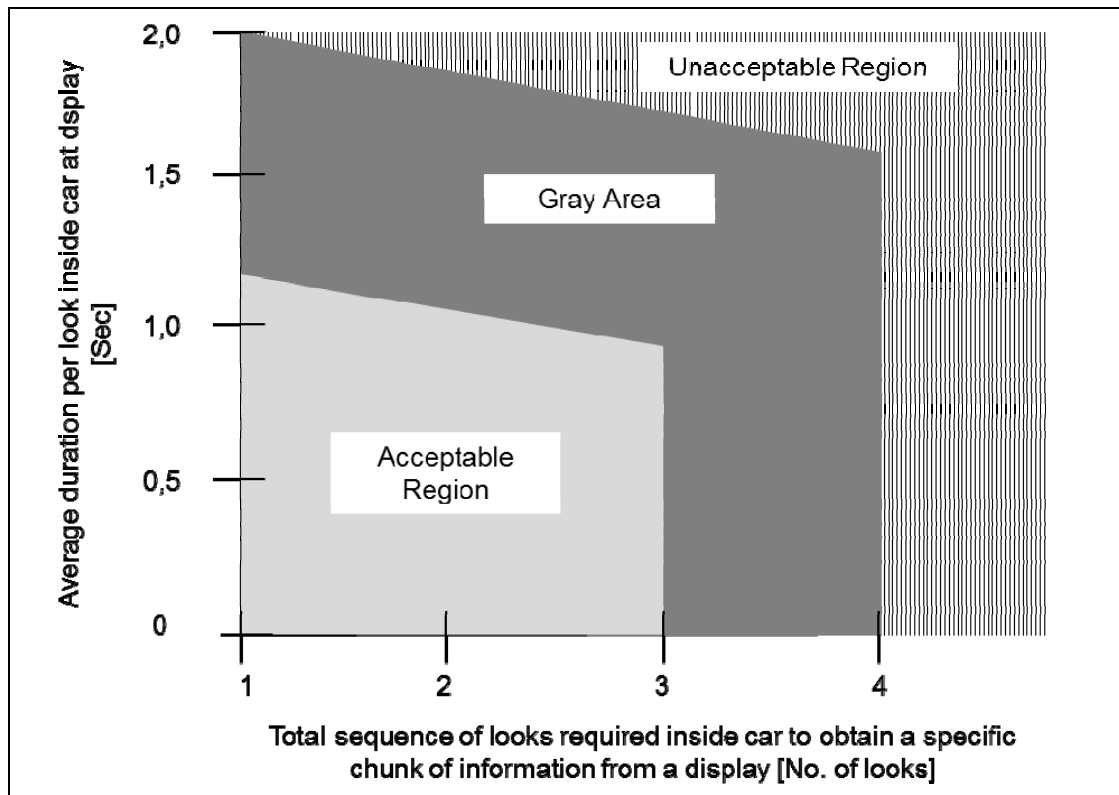


Abbildung 47: Zusammenhang zwischen Blickdauer, Blickhäufigkeit und Kritikalität im Straßenverkehr (Zwahlen, Adams und DeBald, 1988; modifiziert)

In Relation zu den genannten Punkten, hatte die Analyse der Videodaten somit zum Ziel, über das Blickverhalten Aussagen zur Wirkung der integrierten Transitionen auf die Probanden zu generieren. Der Fokus lag hierbei auf Blicken, die bei Übergängen zwischen Fahrer und Automation auf das Display mit den Systemzustandsanzeigen (vgl. Abbildung 39, rechts) gerichtet wurden. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass in der vorliegenden Studie kein Blickerfassungssystem zum Einsatz kam, beschränkte sich die **Auswertung des Videomaterials** diesbezüglich auf die Anzahl der Blicke (Einzelblicke) sowie auf die Blickdauer (gesamt, einzeln). Als Orientierungsmaß für transparente oder erwartungskonforme Transitionen galt dabei eine Blickdauer von 1,5 s pro Blick bei maximal drei Blicken insgesamt. Die dahingehende Analyse der Videostreams erfolgte mit VirtualDub (Version 1.8.6), auf dessen Basis eine frameweise Bearbeitung möglich war. Allerdings bleibt bei der Interpretation der Daten zu berücksichtigen, dass die Aufzeichnung mit nur zehn Frames pro Sekunde angesichts des verfügbaren Speichers während der Versuchsfahrt erfolgen konnte.

#### 5.4.2 Fahrdaten

Wie im Kapitel 5.4.1 erwähnt, zeichnete die verwendete Softwaretechnik ADTF auch alle Fahrdaten auf, welche über den fahrzeugeigenen CAN-Bus (Controller Area Network) geliefert wurden. Mit Hilfe von Vector CAN-Karten erfolgten diesbezüglich die Speicherung von

CAN-Nachrichten des **Antriebs- und Privat-CAN** auf der Festplatte des mitgeführten Laptops (vgl. Abbildung 46). Für die spätere Datenauswertung war dabei wesentlich, dass zum einen alle Aktionen des Wizard an seinem Bedienelement (vgl. Abbildung 38) im CAN-Protokoll auflösbar sind. Zum anderen interessierten die Zeitpunkte, an denen die Probanden ein Systemangebot bestätigten (vgl. Ein-Taste in Abbildung 39, rechts) oder infolge der Übernahme von Fahrfunktion Veränderungen in den Fahrzeugdaten bewirkten.

Analog zu den Videodaten mussten die geloggten Fahrdaten zunächst exportiert werden. Die erhalten CAN-Datenfiles lagen im Anschluss daran im Format ASCII (American Standard Code for Information Interchange), inklusive Zeitstempel vor. Um sich die Daten im zeitlichen Verlauf grafisch anschauen zu können, wurde die Software CANoe (Version 6.0) von Vector zur weiteren Analyse verwendet. Jene benötigt für die Interpretation der CAN-Nachrichten eine fahrzeugspezifische Datenbasis (DataBase Container [dbc]). Mit Hilfe derartiger CAN dbc-Files konnte die Übersetzung des Rohdatenformats mit numerischen Identifiern und symbolischen Botschaften erfolgen. Die auf diese Weise extrahierten Dateninhalte wurden anschließend im Grafik-Modul der Software CANoe über der Zeitachse dargestellt. Die Analyse der Signalverläufe konzentrierte sich dabei auf Fahrzeugkennwerte, welche eine quantitative Aussage zu den definierten Fragestellungen der ersten Studie ermöglichen. Jene entsprachen den in Tabelle 19 aufgelisteten Fahrparametern der Längs- und Querverführung sowie den Werten der Bedienhandlungen seitens Wizard und Proband. Eine vollständige Übersicht über alle erhobenen Fahrzeugkennwerte befindet sich im Anhang.

Tabelle 19: Relevante Kennwerte für die Analyse der Fahrdaten mittels CANoe

Kennwerte	Einheit	CAN-Bus System	Bereich (Min / Max)	Signalquelle
<b>Laterale Fahrzeugkennwerte</b>				
Lenkradwinkelgeschwindigkeit	[°/s]	Antriebs-CAN	[- 45 / 45]	Fahrer vorn
<b>Longitudinale Fahrzeugkennwerte</b>				
Längsbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>	Antriebs-CAN	[- 5 / 5]	Fahrer vorn
<b>Kennwerte der Bedienelemente</b>				
Schalter „Übernahme“	-	Privat-CAN	[0 / 1]	Wizard
Schalter „Lenkung“	-	Privat-CAN	[0 / 1]	Wizard
Ein-Taste	-	Privat-CAN	[0 / 1]	Fahrer vorn
Aus-Taste	-	Privat-CAN	[0 / 1]	Fahrer vorn

Zur gezielten Analyse der Kennwerte aus Tabelle 19 wurde eine grafische Darstellung gewählt, welche die einzelnen Signalverläufe in untereinander liegenden Anzeigefenstern anordnete. In Kombination mit einem Messmodus des Programms (Differenzmessmodus)

war es nun möglich, relevante Abschnitte in den Daten zu markieren und mit Hilfe der Zeitachse zu quantifizieren. Hierbei interessierten diejenigen Segmente, in denen entweder Fahrfunktionen durch den Fahrer an die Automation übergeben (**Aktivierungsphase**) oder durch ihn wieder übernommen wurden (**Deaktivierungsphase**). Das heißt, die Auswertung konzentrierte sich darauf, wann eine Reaktion der Probanden auf ein Systemangebot bzw. auf eine Übernahmeaufforderung erfolgte. Hintergrund dessen war die Annahme, dass sich nicht transparente oder unerwartete Übergänge in verzögerten oder ausbleibenden Reaktionen niederschlagen (vgl. Kapitel 5.2). Analog dazu, differenzierte die Analyse der Fahrdaten je nach Richtung der Transition zwischen den Parametern der Tabelle 20:

Tabelle 20: Parameterberechnung aus Fahrzeugkennwerten für Reaktionszeitanalyse

Parameter aus Fahrdaten	Einheit	Operationalisierung
<b>Aktivierungsdauer</b>	[s]	Zeitdauer vom fahrzeugseitigen Systemangebot bis zur Bestätigung dessen durch den Fahrer mittels Bedienelement
<b>Übernahmedauer</b>	[s]	Zeitdauer von der Übernahmeaufforderung des Systems bis zur ersten Reaktion des Fahrers in Längs- bzw. Querrichtung des Fahrzeugs

Die **Aktivierungsdauer** bezieht sich gemäß Tabelle 20 immer auf Transitionen in Richtung Automation, die je nach eingeschaltetem System mit einer teilweisen oder vollständigen Abgabe der Fahrzeugkontrolle einhergingen. Diesbezüglich wurde der Beginn des relevanten Datenbereichs auf den Zeitpunkt festgelegt, an dem der Versuchsleiter das Modusangebot an den Probanden triggerte. Hierfür dienten die aufgezeichneten Videodaten als Grundlage. Die Definition des Ende des Datensegments erfolgte über das fahrerseitige Drücken der Taste „EIN“ am entsprechenden Bedienelement (vgl. Abbildung 39, rechts).

Im Fall der **Übernahmedauer** (vgl. Tabelle 20) lag der Fokus auf Transitionen in Richtung Fahrer, die je nach deaktivierter Fahrfunktion mit einer teilweisen oder vollständigen Rückgabe der Fahrzeugkontrolle einhergingen. Der Anfangspunkt des betrachtenden Zeitabschnitts in den Daten wurde hierbei über die Bedienhandlungen des Wizard definiert. Jene waren in Abhängigkeit der Art der Transition mit einer entsprechenden Ausschaltung von Systemen verbunden. Das heißt, der Wizard legte je nachdem, ob die Transition direkt bzw. indirekt war, alle Schalter oder nur den Schalter „Lenkung“ (Systemmodus „ACC“) auf seinem Bedienelement nach unten (vgl. Abbildung 38). Analog dazu veränderten sich deren Kennwerte im Zeitschrieb von „1“ auf „0“. Das Ende des betrachteten Segments bestimmten die fahrerseitigen Reaktionen, die in Relation zum folgenden Systemmodus mit entsprechenden Variationen in den lateralen sowie longitudinalen Größen des Antriebs-CAN einhergingen (vgl. Tabelle 20).

Der Zeitpunkt des Auslösens der Übernahmeaufforderung sowie die Reaktionszeitpunkte der Versuchspersonen wurden zudem mit den Videodaten (vgl. Kapitel 5.4.1) verifiziert.

### **5.4.3 Fragebogendaten**

Die Datenbasis der ersten Studie ergänzten zudem Fragebögen, welche einerseits zu **Untersuchungsbeginn** die Ausgangslage der Probanden erfassten (vgl. Anhang). Hierbei wurden Daten über die Soziodemografie, die Fahrleistung, die Erfahrung mit FAS, das subjektive Befinden sowie zur Technikaffinität erhoben (vgl. Kapitel 5.3.7). Andererseits stellte der Versuchsleiter **während der Fahrt** Fragen an die Probanden, die den Systemmodus und die Transition selbst betrafen (vgl. Anhang). Sie umfassten übergreifend folgende Themenblöcke:

- **Fragen zur Transition:**
  - Subjektive Einschätzung der Art und Zeitdauer der eigenen Reaktion
  - Subjektiv wahrgenommene Kritikalität des Übergangs
  - Subjektiv wahrgenommene Transparenz des Übergangs
  - Subjektiv wahrgenommenes Kontrollerleben
  - Verbesserungswünsche
- **Fragen zum Systemmodus**
  - Subjektiv wahrgenommenes Beanspruchungserleben
  - Subjektive Einschätzung zur Funktionsweise des Systems
  - Subjektive Bewertung der Systemauslegung
  - Subjektive Bewertung möglicher Einsatzbereiche für das System

Zum **Abschluss der Versuchsfahrt** schätzten die Testpersonen ihr subjektives Befinden erneut ein. Zudem bewerteten sie die gleichzeitige Verfügbarkeit sowie Kombinierbarkeit von unterschiedlichen Systemmodi im Fahrzeug.

Die Beantwortung der Fragen zur Transition bzw. zum Systemmodus erfolgte auf einer 15-stufigen Skala, welche nach dem Prinzip der **Kategorienunterteilungsskala** (Heller, 1985) aufgebaut wurde. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 48 anhand eines Items aus der Befragung der ersten Studie dargestellt. Analog dazu impliziert die Kategorienunterteilungsskala bei der Bewertung ein zweistufiges, sequentielles Vorgehen. Demgemäß sollten sich die Probanden zunächst für eine der fünf Oberkategorien entscheiden. Im vorliegenden Beispiel beinhalteten diese Bereiche Wertungen von „sehr langsam“ bis „sehr schnell“ (vgl. Abbildung 48). Im zweiten Schritt erfolgte dann eine Feindifferenzierung innerhalb der gewählten Kategorie. Diese umfasste für alle Items der Realfahrtuntersuchung jeweils drei Abstufungsmöglichkeiten (vgl. Abbildung 48).

Wie schnell haben Sie auf die Übernahmeaufforderung reagiert?

sehr langsam			langsam			mittel			schnell			sehr schnell		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Abbildung 48: Beispielitem mit verwendeter Kategorienunterteilungsskala (Heller, 1985)

#### 5.4.4 Versuchsleiterprotokolle

Neben den bereits benannten Daten wurden in der ersten Studie gleichfalls Versuchsleiterprotokolle geführt. Sie dienten zur Dokumentation von Wetter- und Straßenverhältnissen, besonderen Auffälligkeiten, Kommentaren der Probanden sowie fehlenden Messdaten (vgl. Anhang). Unter letzterem Gesichtspunkt ist anzumerken, dass in die Auswertung der Daten nur 18 der 20 Probanden mit einem vollständigen Datensatz eingingen. Der Grund hierfür ist, dass bei einer Testperson technische Störungen dazu führten, dass keine Video- und Fahrverhaltensdaten geloggt wurden. Bei einem anderen Probanden lag eine zu geringe Spannungsversorgung für den Schwarzfahrerstromkreis vor, die einen Abbruch des Versuchs vor Fahrtbeginn bedingte.

#### 5.4.5 Zusammenfassung

Die Abbildung 49 gibt einen zusammenfassenden Überblick über alle Daten, die zur Beantwortung der Fragestellungen der ersten Studie dienten und eben erläutert wurden.

Objektive Maße	Subjektive Maße
<p><b>(1) Videodaten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Blickverhalten auf Systemzustandsanzeige bei Transitionen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anzahl und Nummer der Blicke</li> <li>- Blickdauer (gesamt, einzeln)</li> <li>- Blicke &gt;1,5 sec bei max. 3 Blicken insgesamt</li> </ul> </li> <li>• <b>Fahrerverhalten bei Transitionen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zeitpunkt der Reaktion bei Systemangeboten &amp; Systemabwürfe</li> <li>- Art und Weise der Reaktion</li> </ul> </li> <li>• <b>Systemseitige Zustandsveränderungen im Display</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zeitpunkt der Anzeige des Systemangebots</li> <li>- Zeitpunkt der Anzeige der Übernahmeaufforderung</li> </ul> </li> </ul> <p><b>(2) Fahrdaten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Fahrerverhalten bei Transitionen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aktivierungsdauer (Zeit vom Systemangebot bis zur Fahrerbestätigung mittels Bedienelement)</li> <li>- Übernahmedauer (Zeit von Übernahmeaufforderung bis zur 1. Fahrerreaktion in Längs- bzw. Querrichtung des Fahrzeugs)</li> </ul> </li> </ul>	<p><b>(1) Fragebögen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Fragen vor der Fahrt</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Soziodemografie</li> <li>- Fahrleistung</li> <li>- Erfahrung mit FAS</li> <li>- Subjektives Befinden</li> <li>- Umgang mit Technik</li> </ul> </li> <li>• <b>Fragen während der Fahrt</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bewertung der Transition</li> <li>- Bewertung des Systemmodus</li> </ul> </li> <li>• <b>Fragen nach der Fahrt</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Subjektives Befinden</li> <li>- Bewertung Automationsspektrum</li> </ul> </li> </ul> <p><b>(2) Versuchsleiterprotokoll</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Kommentare, Wetterverhältnisse, Straßenverhältnisse, Messdaten</b></li> </ul>

Abbildung 49: Überblick über die ausgewerteten Daten der ersten Studie

Die **inferenzstatistische Analyse** der in Abbildung 49 dargestellten Daten erfolgte mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS (Version 16.0). Demgemäß gaben zunächst explorative Datenanalysen sowie Kolmogorov-Smirnov-Tests einen umfassenden Überblick über die Verteilung der Daten. Sie ermöglichten zudem den Ausschluss von eventuellen Ausreißern. Im Anschluss daran kamen entsprechend den Voraussetzungen parametrische und nicht-parametrische Verfahren zur Anwendung ( $\alpha = .05$ ). Erstere umfassten je nach Anzahl der abhängigen Variablen univariate oder multivariate Varianzanalysen. Häufigkeitsanalysen und Mittelwertsvergleiche für unabhängige Stichproben ergänzten die Auswertung. Lag keine Normalverteilung der Daten vor ( $p < .05$ ), wurde der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben angewendet. Ergab sich mittels Levene-Test eine Varianzungleichheit in den Daten ( $p < .20$ ), erfolgte der Rückgriff auf den Welch-Test. Da es bei der Datenauswertung ebenso zu Vergleichen innerhalb einer Stichprobe kam (z.B. beim Prä-Post-Fragebogen SOFI), diente gleichfalls der t-Test für verbundene Stichproben bzw. bei fehlender Normalverteilung ( $p < .05$ ) der Wilcoxon-Test zur statistischen Beurteilung der Daten. Lag ein Trend in den Daten vor, wird dieser immer ab einem Signifikanzniveau von  $p < .10$  berichtet. Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die für die Kategorienunterteilungsskala nach Heller (1985) ein Intervallskalenniveau angenommen wurde (Wirtz & Nachtigall, 2006).

## 5.5 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse der Realfahrtstudie differenziert zwischen der **Richtung der Transition**. Hierbei ist entscheidend, ob die Verschiebung der Fahrzeugkontrolle mit einer Aktivierung oder Deaktivierung von Fahrfunktionen einherging. Da die Ergebnisse beider Richtungen aufgrund der Zeitdauer, die dem Fahrer für eine Reaktion zur Verfügung steht, nicht direkt miteinander vergleichbar sind (vgl. Kapitel 4.3), gliedert sich die Struktur der Ergebnisdarstellung daher in die zwei Ergebnisblöcke:

- **1. Ergebnisblock:** Transitionen in Richtung Automation
- **2. Ergebnisblock:** Transitionen in Richtung Fahrer

Zum **ersten Ergebnisblock** gehören alle Resultate, die den Wechsel vom Modus „Fahrer selbst“ auf „Assistent“ bzw. „Pilot“ und damit den Grad der Kontrollverschiebung hin zur Automation betreffen (vgl. Abbildung 50). Weiterhin gehen indirekte Übergänge über die Zwischenstufe „ACC“ in die Betrachtungen ein (vgl. Abbildung 50). Diese Transitionsituationen ergeben sich aus den Erläuterungen zur Abbildung 35 im Kapitel 5.3.2. Die inferenzstatistischen Analysen beziehen sich einerseits auf den Vergleich der unterschiedlichen Weiten an Kontrollangaben aus „Fahrer selbst“ (Merkmal: „Grad der Kontrollverschiebung“) und andererseits auf den Übergang über Zwischenstufen der Automation

(Merkmal: „Indirekte Transition“) in Referenz zu kompletten (direkten) Funktionsaktivierungen (vgl. Kapitel 5.5.1).

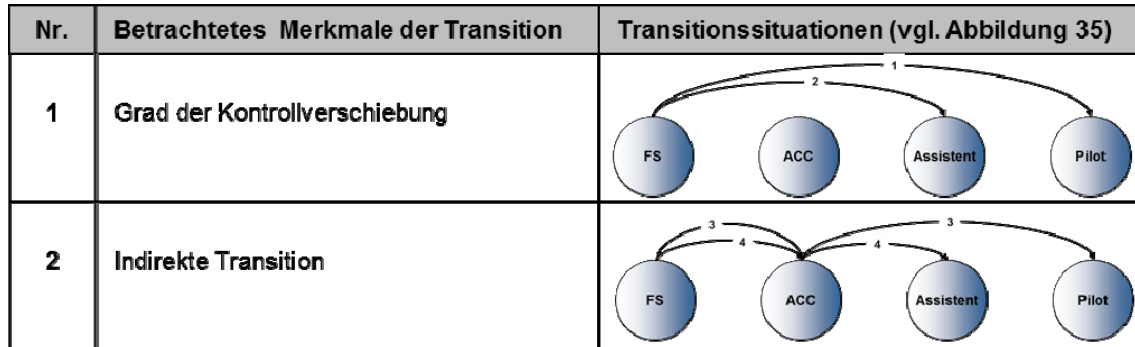


Abbildung 50: Transitionen des ersten Ergebnisblocks in Richtung Automation

Der **zweite Ergebnisblock** besteht aus allen Befunden, die mit Übernahmeaufforderungen an den Fahrer einhergingen (vgl. Abbildung 51). Es werden sowohl vollständige Kontrollrückgaben auf „Fahrer selbst“ als auch indirekte Transitionen auf den Modus „ACC“ betrachtet. Bei letzteren Übergängen interessiert erneut, welche Unterschiede bei diesen Teilrückgaben der Kontrolle an den Fahrer zu kompletten Funktionsdeaktivierungen bestehen (vgl. Kapitel 5.5.2). Die Transitionssituationen selbst ergeben sich wiederum aus der Erläuterung zur Abbildung 35 im Kapitel 5.3.2.

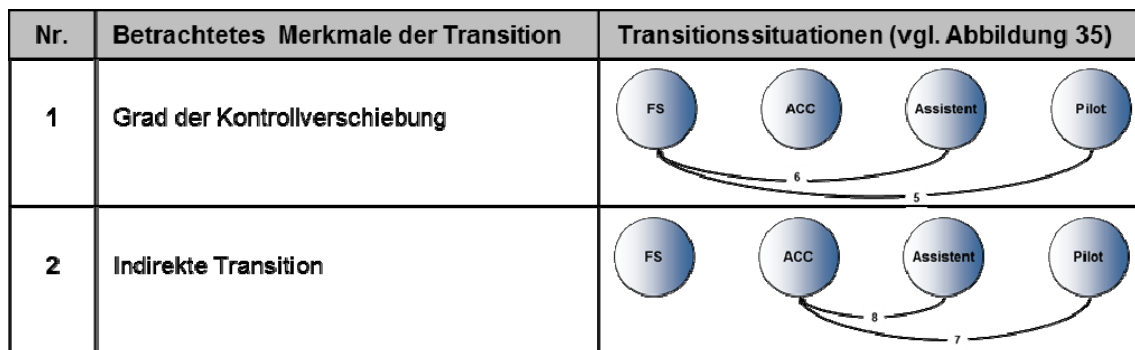


Abbildung 51: Transitionen des zweiten Ergebnisblocks in Richtung Fahrer

### 5.5.1 Erster Ergebnisblock: Transitionen in Richtung Automation

Für diesen Ergebnisteil wurden insgesamt 20 Übergabesituationen in Richtung Automation analysiert. Jene resultieren aus der Anzahl der Kontrollverschiebungen vom „Fahrer selbst“ auf die Modi „Assistant“ und „Pilot“ sowie der indirekten Transitionen über die Zwischenstufe „ACC“ (vgl. Abbildung 50). In die univariaten bzw. multivarianten Analysen gingen als feste Faktoren der „Grad der Kontrollverschiebung“ und die „Art der Transition“ ein (vgl. Abbildung 43). Dabei lag der Fokus zunächst auf den Daten, die aus der dritten Transitionssituation resultierten (vgl. Kapitel 5.3.6 und Abbildung 44). Ausgewertet wurden zuerst die

Aktivierungsdauer als Maß der Reaktion des Fahrers, dann das Blickverhalten anhand der Videodaten und abschließend die subjektiven Angaben (vgl. Kapitel 5.4.2). Die Ergebnisdarstellung erfolgt für die hier betrachteten Merkmale von Transitionssituationen gleichzeitig und nicht nach Haupt- und Interaktionseffekt abschnittsweise separiert.

### Grad der Kontrollverschiebung & Indirekte Transition

Bei der Analyse der **Fahrdaten** (vgl. Aktivierungsdauer in Tabelle 20) war von Interesse, ob sich die mittleren Zeitdauern für die Bestätigung des Systemangebots zwischen den Systemmodi „Assistent“ und Pilot“ (Grad der Kontrollverschiebung) sowie in Abhängigkeit der Art der Transition voneinander unterscheiden (vgl. Kapitel 5.2). Verzögerte bzw. markante Reaktionen könnten darauf hindeuten, dass dem Fahrer die zu differenzierenden Teilfunktionen nicht transparent sind bzw. das Systembewusstsein durch die Charakteristik des Übergangs gemindert wird (vgl. Tabelle 13). Zudem wurden Wechselwirkungseffekte untersucht, deren postulierte Auswirkungen vor allem die indirekte Transition auf den Modus „Pilot“ betreffen (vgl. Tabelle 15). Da die relevanten Kennwerte für die Analyse der Fahrdaten (vgl. Tabelle 19) die Voraussetzungen der Normalverteilung ( $p = .80$ ) sowie der Varianzhomogenität ( $p = .51$ ) erfüllen, konnte die Überprüfung mittels varianzanalytischer Verfahren stattfinden.

Bezüglich der **Aktivierungsdauer** zeigten sich keine signifikanten Haupteffekte für die Faktoren „Grad der Kontrollverschiebung“ ( $F[1, 12] = 2.70$ ;  $p = .126$ ;  $\eta^2 = .184$ ) und „Art der Transition“ ( $F[1, 12] = 0.10$ ;  $p = .765$ ;  $\eta^2 = .008$ ). Zudem konnte kein Interaktionseffekt nachgewiesen werden ( $F[1, 12] = 2.45$ ;  $p = .144$ ;  $\eta^2 = .169$ ). Hierbei ist zu beachten, dass die Aktivierungsdauern relativ starke Streuungen mit bis zu 2.5 s aufwiesen (vgl. Abbildung 52, links). Zudem fiel die Stichprobengröße je Zelle mit  $N = 5$  sehr gering aus. Die Teststärke ist damit vermutlich nicht sehr hoch, so dass auch vorhandene Effekte möglicherweise nicht entdeckt werden können (Bortz, 1999).

Unter Beachtung dieser Aspekte wurden die Daten nochmals grafisch analysiert. Hierbei zeigte sich, dass die Mittelwerte der Aktivierungsdauer deskriptiv durchaus unterschiedlich zwischen den beiden Systemmodi ausfielen (vgl. Wechselwirkungsdiagramm in Abbildung 52, rechts).



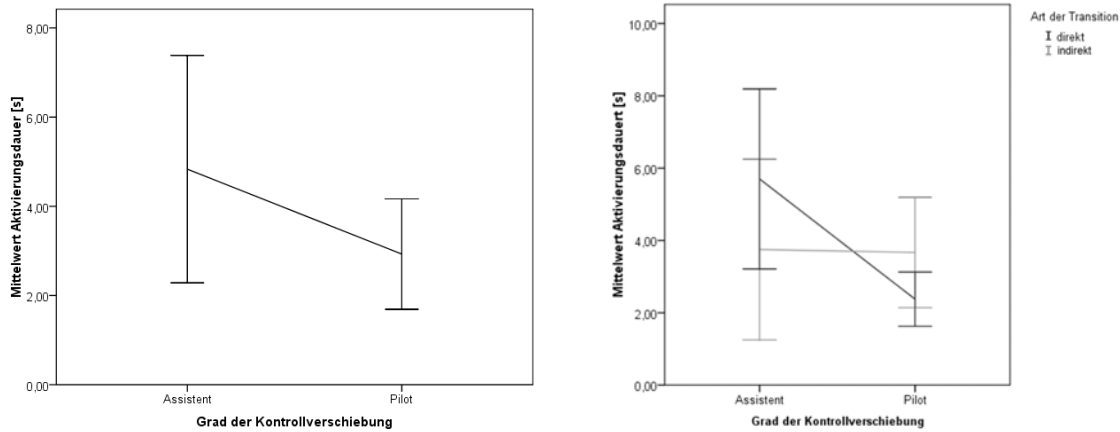


Abbildung 52: Aktivierungsdauer ( $M$ ,  $SD$ ) für Transitionen auf „Assistent“ und „Pilot“ für den „Grad der Kontrollverschiebung“ und die „Art der Transition“

Bei der Detailbetrachtung der Abbildung 52 (rechts) zeichnet sich eine hybride Wechselwirkung der beiden Faktoren in den Aktivierungsdauern ab (Bredenkamp, 1974). Trotz fehlender Signifikanz wird daher grundsätzlich vermutet, dass der Faktor „Grad der Kontrollverschiebung“ bei entsprechend großer Stichprobe sowie kleineren Streuungen in den Werten zu unterschiedlichen Effekten führen würde. Im vorliegenden Fall benötigten die Probanden, welche den Modus „Assistent“ aktivierten im Durchschnitt 1.7 s länger als diejenigen Testpersonen mit der Kontrollverschiebung auf „Pilot“ (vgl. Abbildung 52, links). Interessanterweise ergab sich ein ähnliches Bild bei der ersten Transition, die sich kurz nach Versuchsbeginn ereignete (vgl. Kapitel 5.3.6). Hier bestätigten die Probanden im Mittel nach ca. 5 s ( $SD = 3.9$ ) das Angebot für den „Assistenten“ und nach ca. 3 s ( $SD = 1.56$ ) das für den Modus „Pilot“ (vgl. Anhang). Die Unterschiede waren allerdings ebenso nicht signifikant ( $F[1, 14] = 2.14$ ;  $p = .166$ ;  $\eta^2 = .132$ ).

In Abbildung 52 (rechts) fällt zudem auf, dass der direkte Übergang auf „Assistent“ im Vergleich zur „indirekten Transition“ mit deutlich längeren Aktivierungsdauern einhergeht ( $M_{\text{direkt}} = 5.7$  s,  $M_{\text{indirekt}} = 3.8$  s). Der Differenzwert von 1.95 s ( $F[1, 7] = 1.36$ ;  $p = .282$ ;  $\eta^2 = .162$ ) weicht außerdem stärker von dem der Transitionen auf „Pilot“ ab (Differenz: 1.3 s;  $F[1, 5] = 2.25$ ;  $p = .194$ ;  $\eta^2 = .310$ ).

Um bezüglich der Merkmale „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Indirekte Transition“ weitere Beurteilungs- bzw. Erklärungskriterien heranzuziehen, wurde als nächstes das **Blickverhalten aus den Videodaten** der Probanden analysiert. Gemäß den Erläuterungen in Kapitel 5.4.1 standen dementsprechend die Blickdauer ( $M_{\text{Einzel}}$ ,  $M_{\text{Gesamt}}$ ), die Anzahl bzw. Nummer der Blicke sowie die Blicke über 1.5 s Dauer im Vordergrund der Betrachtung. Alle Kennwerte bezogen sich auf Blicke auf die Systemzustandsanzeige nach Auslösen der Transition.

Aus der grafischen Auswertung der Videodaten ging hierbei hervor, dass das Blickverhalten der Versuchspersonen bei der Aktivierung der Modi „Assistent“ bzw. „Pilot“ in der dritten Übergabesituation differierte (Abbildung 44). Getrennt nach Art der Transition werden jene Unterschiede in der Abbildung 53 anhand der genannten Kennwerte des Blickverhaltens dargestellt. Das heißt, sie visualisieren, wie sich die Blickdauer [s] im Mittel beim ersten, zweiten, dritten bzw. vierten Blick auf die Systemzustandsanzeige veränderte, bevor die Testpersonen das Systemangebot bestätigten. Dabei ist zu beachten, dass die für das Verständnis der Transition benötigten Blicke für die einzelnen Probanden differierten und damit das  $N$  über die Nummer der Blicke abnahm (vgl. Abbildung 53). Es wurden zudem maximal vier Blicke aufgewendet.

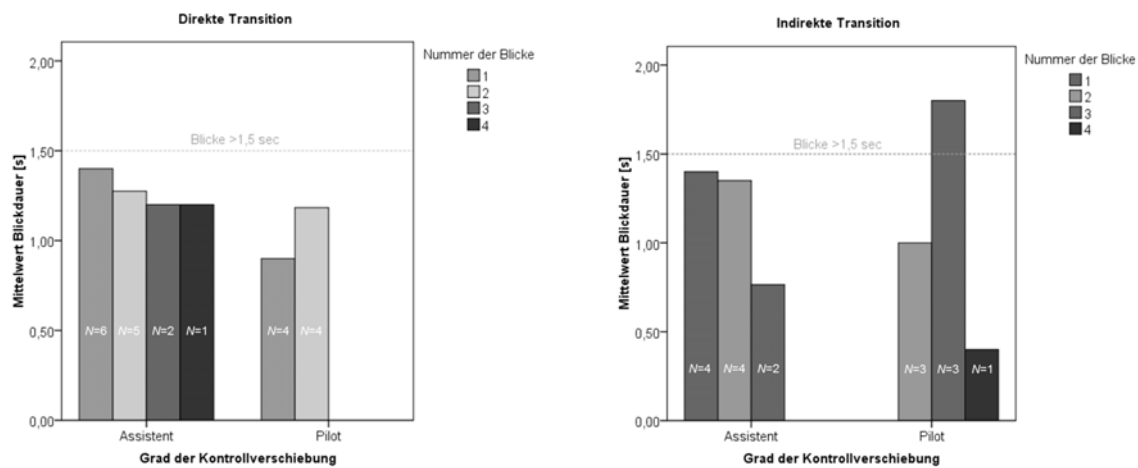


Abbildung 53: Mittlere Blickdauer [s] in Relation zur Nummer der Blicke für die Aktivierung der Modi „Assistent“ bzw. „Pilot“ in direkter (links) und indirekter Form (rechts)

Unter Berücksichtigung der Abbildung 53 (links) fällt zum einen auf, dass der Mittelwert der Blickdauern bei beiden „Graden der Kontrollverschiebung“ unter 1,5 s lag. Zum anderen geht hervor, dass die Probanden mit dem Systemangebot „Assistent“ grundsätzlich mehr Blicke als diejenigen mit „Pilot“ benötigten, bevor eine Systemaktivierung stattfand. Der Unterschied in der Nummer der Blicke ist allerdings nicht signifikant ( $\chi^2 [3, N = 9] = 2.12; p = .549$ ).

Mit Bezug zu den Ergebnissen zur Aktivierungsdauer lässt die zeitintensivere Prüfung der Frage „Assistent aktivieren?“ auf der Systemzustandsanzeige (vgl. Abbildung 41) dennoch annehmen, dass das Angebot weniger gut verstanden wurde. Die Gründe hierfür könnten in der Darstellung auf dem Display selbst liegen oder inhaltlich durch den Modus und dessen Aktivierungsart bedingt sein. Da die Anzeige vor Versuchsbeginn bildlich erläutert und deren Verständnis überprüft wurde, spricht mehr für die zweite Hypothese. Dies wird auch durch die Analyse des Blickverhaltens bei der ersten Transition (vgl. Kapitel 5.3.6) vom Modus „FS“ auf „Assistent“ oder „Pilot“ untermauert (vgl. Abbildung 54). Im Vergleich zur Kontrollver-

schiebung auf den „Piloten“ ergaben sich hier beim Übergang auf „Assistent“ signifikant mehr Blicke, welche die, in der vorliegenden Arbeit definierte Schwelle von 1.5 sec Dauer, überschritten ( $\chi^2 [1, N = 9] = 5.63; p = .048$ ). Die Gesamtanzahl der Blicke aufs Display mit den Systemzustandsanzeigen unterschied sich allerdings nicht signifikant ( $\chi^2 [2, N = 9] = 1.24; p = .539$ ). Analysiert man hingegen die mittlere Blickdauer über alle Blicke hinweg (vgl. Abbildung 54, rechts), ergibt sich ein signifikanter Unterschied bezüglich des „Grads der Kontrollverschiebung“ ( $F[1, 14] = 12.22; p = .004; \eta^2 = .466$ ).

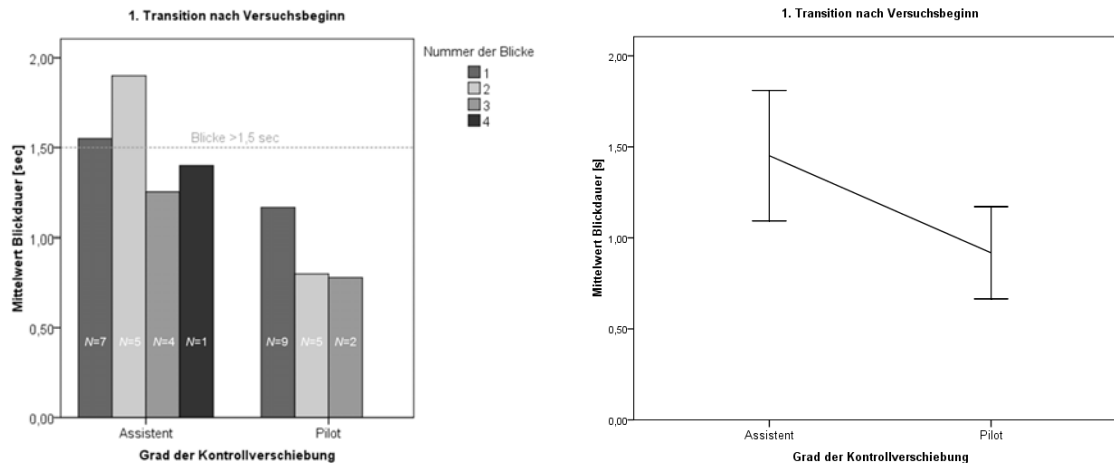


Abbildung 54: Mittlere Blickdauer [s] in Relation zur Nummer der einzelnen (links) und summierten Blicke (rechts) für die 1. Transition nach Versuchsbeginn mit Kontrollverschiebung auf „Assistent“ bzw. „Pilot“

Betrachtete man analog dazu das Blickverhalten bei der „indirekten Transition“ lässt sich gemäß Abbildung 53 (rechts), einerseits eine geringfügige, jedoch nicht signifikante Abnahme in der Anzahl (Nummer) der Blicke vor der Aktivierung des Modus „Assistent“ feststellen ( $\chi^2 [2, N = 9] = 1.58; p = .665$ ). So wurden im Vergleich zur direkten Schaltung auf „Assistent“ (vgl. Abbildung 53, links) nur maximal drei Blicke aufgewendet. Die ersten beiden dauerten dabei im Mittel am längsten ( $\bar{X}$  1. Blick = 0.97 s vs.  $\bar{X}$  2. Blick = 1.30 s).

Andererseits fällt in Abbildung 53 (rechts) auf, dass die Probanden bei der indirekten Transition auf „Pilot“ mehr Blicke auf das Display richteten als beim direkten Übergang (vgl. Abbildung 53, links). Zudem traten bei zwei Probanden Blicke mit über 1.5 s Dauer auf. Diese deskriptiven Unterschiede wurden jedoch nicht signifikant ( $\chi^2 [3, N = 9] = 3.94; p = .268$  und  $\chi^2 [1, N = 9] = 1.56; p = .429$ ). Gleiches galt für die inferenzstatistische Analyse der mittleren Blickdauer. Jene ergab für den varianzhomogenen ( $p = .29$ ) und normalverteilten ( $p = .82$ ) Parameter keine Signifikanz für die Haupteffekte der Faktoren „Grad der Kontrollverschiebung“ ( $F[1, 12] = 0.19; p = .667; \eta^2 = .016$ ) und „Art der Transition“ ( $F[1, 12] = 0.45; p = .513, \eta^2 = .036$ ). Zudem zeigte sich kein Interaktionseffekt ( $F[1, 12] = 0.18; p = .680, \eta^2 = .015$ ).

Um weiteren Aufschluss über die Wirkung der beiden Faktoren zu erhalten, wurden die **subjektiven Daten** als zusätzliche Beurteilungsgröße herangezogen. Diesbezüglich lag der Fokus zunächst auf der wahrgenommenen Verständlichkeit des Systemvorschlags sowie der subjektiven Sicherheit der Probanden bei der Aktivierung des Modus. Übergänge, die nicht den Erwartungen der Testpersonen entsprachen, sollten sich über jene Befragungsdaten gut auflösen lassen. In dem Zusammenhang stellt die Abbildung 55 die entsprechenden Bewertungen in Form von Wechselwirkungsdiagrammen für die Merkmale „indirekte Transition“ sowie „Grad der Kontrollverschiebung“ dar. Die subjektiven Angaben erfolgten auf einer 15-stufigen Skala, bei der „1“ einer geringen und „15“ einer hohen Ausprägung auf dem Item entsprach. Die Ergebnisse betreffen wiederum die dritte Transitionssituation im Versuchsablauf (vgl. Abbildung 44).

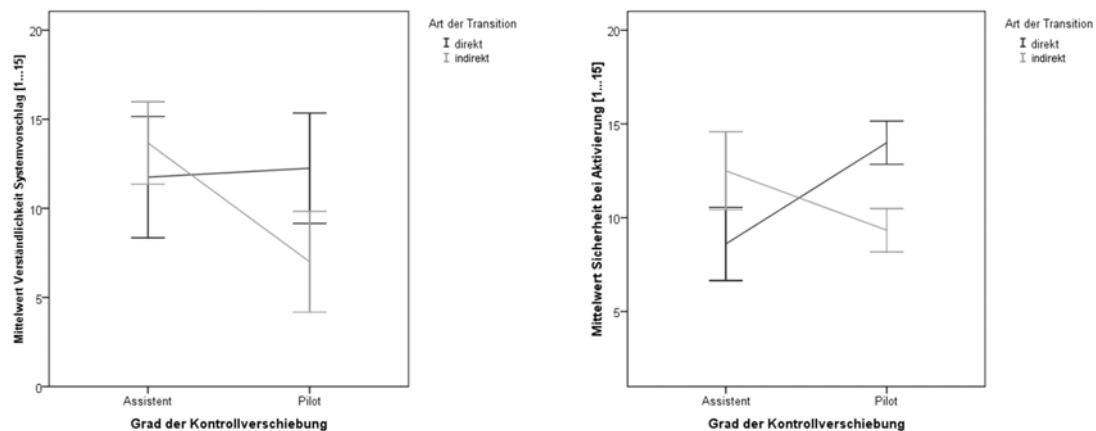


Abbildung 55: Verständlichkeit des Systemvorschlags (M, SD, links) und der Sicherheit bei der Systemaktivierung (M, SD, rechts) in Abhängigkeit des „Grads der Kontrollverschiebung“ sowie der „Art der Transition“

Mit Bezug zur Abbildung 55 (links) gehen aus der varianzanalytischen Betrachtung der abhängigen Variable „Verständlichkeit des Systemvorschlags“ folgende Ergebnisse hervor: „Grad der Kontrollverschiebung“ ( $F[1, 12] = 4.16$ ;  $p = .064$ ;  $\eta^2 = .257$ ), „Art der Transition“ ( $F[1, 12] = 1.22$ ;  $p = .292$ ;  $\eta^2 = .092$ ), „Grad der Kontrollverschiebung\*Art der Transition“ ( $F[1, 12] = 5.62$ ;  $p = .035$ ;  $\eta^2 = .319$ ). Demgemäß zeigte sich ein signifikanter Interaktionseffekt, aber kein Haupteffekt für die untersuchten Faktoren. Die erhaltene, disordinale Wechselwirkung ist gleichfalls im Profilplot der Varianzanalyse abbildbar (vgl. Abbildung 55, links). Diesbezüglich zeigte sich in den Analysen, dass ausschließlich die indirekten Übergänge bei Aktivierung des Modus „Pilot“ im Vergleich zu den direkten als weniger transparent von den Probanden beurteilt wurden ( $F[1, 9] = 7.06$ ;  $p = .033$ ;  $\eta^2 = .502$ ). Dies war nicht beim Modus „Assistent“ der Fall ( $F[1, 5] = 0.69$ ;  $p = .433$ ;  $\eta^2 = .122$ ).

Ein vergleichbares Bild ergab sich bei der Analyse der subjektiven Sicherheit der Testpersonen darüber, welchen Modus sie soeben aktiviert haben (vgl. Abbildung 55, rechts). Auch hier resultierten aus der inferenzstatistischen Auswertung der Faktoren keine signifikanten Haupteffekte für die „Art der Transition“ ( $F[1, 12] = 0.20$ ;  $p = .666$ ;  $\eta^2 = .016$ ) sowie für den „Grad der Kontrollverschiebung“ ( $F[1, 12] = 1.66$ ;  $p = .222$ ;  $\eta^2 = .122$ ). Es ergab sich jedoch ein hoch signifikanter Interaktionseffekt ( $F[1, 12] = 24.443$ ;  $p < .000$ ;  $\eta^2 = .671$ ). Mit Bezug auf varianzanalytische Einzelanalysen waren sich die Probanden bei indirekten Übergängen auf „Pilot“ ( $F[1, 5] = 28.00$ ;  $p = .003$ ;  $\eta^2 = .848$ ) und bei direkten Transitionen auf „Assistent“ ( $F[1, 7] = 8.39$ ;  $p = .023$ ;  $\eta^2 = .545$ ) unsicherer über den jeweilig aktivierten Modus.

Die in Abbildung 55 dargestellten Ergebnisse spiegeln sich gleichfalls in den Antworten der Versuchspersonen auf die Frage „Wie lange hat es gedauert, bis Sie das Gefühl hatten, wieder alles im „Griff zu haben?“ wider (vgl. Anhang). So gaben die Probanden, welche den Modus „Assistent“ aktivierten an, sich bei der indirekten Transition schneller „im Loop“ gefühlt zu haben ( $M = 1.25$  s;  $SD = 1.98$  s) als beim direkten Übergang ( $M = 2.90$  s;  $SD = 0.50$  s). Im Gegensatz dazu verhielten sich die Aussagen derjenigen Personen, die von „Fahrer selbst“ auf den Modus „Pilot“ wechselten ( $M_{\text{direkt}} = 0.75$  s;  $SD_{\text{direkt}} = 0.50$  s vs.  $M_{\text{indirekt}} = 4.83$  s;  $SD_{\text{indirekt}} = 2.75$  s). Jene Einschätzungen der Probanden wurden inferenzstatistisch für die Wechselwirkung signifikant ( $F[1, 12] = 11.79$ ;  $p = .005$ ;  $\eta^2 = .496$ ), für die Haupteffekte hingegen nicht („Grad der Kontrollverschiebung“:  $F[1, 12] = 0.74$ ;  $p = .407$ ;  $\eta^2 = .058$  vs. „Art der Transition“:  $F[1, 12] = 2.12$ ;  $p = .171$ ;  $\eta^2 = .150$ ). Detailanalysen zeigten dabei, dass die Unterschiede ausschließlich den Modus „Pilot“ ( $F[1, 5] = 8.98$ ;  $p = .030$ ;  $\eta^2 = .642$ ) und nicht „Assistent“ ( $F[1, 7] = 2.57$ ;  $p = .153$ ;  $\eta^2 = .269$ ) betrafen.

Das Ergebnis deckt sich teilweise mit den Wünschen der Versuchspersonen bezüglich der präferierten Art der Aktivierung der zwei Modi. So sprachen sich  $N = 7$  von neun Probanden in der Nachbefragung für eine Aktivierung des Systems „Assistent“ über ACC aus. Dagegen bevorzugten  $N = 6$  von acht Studienteilnehmern die direkte Schaltung auf „Pilot“. Diese Häufigkeitsverteilung wurde mittels exaktem Fisher-Test tendenziell signifikant ( $p = .057$ ). Zudem zeigte sich, dass nahezu alle Probanden nach dem erfolgten Übergang prüften, ob und wie das Fahrzeug nach der Aktivierung regelt ( $N = 15$ ). Hier wurde zumeist auf dessen Beschleunigungsverhalten und auf die Lenkung geachtet. Die Systemzustandsanzeige rückte in den Hintergrund.

Bezüglich der untersuchten Transitionen in Richtung Automation ist anzumerken, dass es unabhängig von der Art des Übergangs dreimal während des Versuchs zu Verwechslungen zwischen den Modi „Assistent“ und „Pilot“ kam. So wurde bei der Aktivierung des „Assisten-

ten“ in  $N = 3$  Fällen fälschlicherweise davon ausgegangen, dass das Fahrzeug vollständig die Querführung übernimmt. Die Versuchspersonen nahmen in der Folge die Hände vom Lenkrad und zeigen somit einen „error of commission“ (Sarter & Woods, 1995). Demnach konnte in der Realfahrtstudie das Phänomen **Mode Confusion** beobachtet werden, ohne dass es Übergänge zwischen den einander sehr ähnlichen Systemen gab. Anscheinend fiel es den Testpersonen nicht leicht, die zwei Spurführungsvarianten kognitiv voneinander zu trennen. Möglicherweise spielt hierbei die entscheidende Rolle, dass sie gemeinsam zur Verfügung stehen. Dies bestätigte sich auch in der Abschlussbefragung. So präferierten alle Testpersonen eine Bandbreite an verfügbaren Funktionen im Fahrzeug, die nicht gleichzeitig die Modi „Assistent“ und „Pilot“ umfassten.

Darüber hinaus zeigte die Befragung zum wahrgenommenen Beanspruchungserleben sowie zur Funktionsweise der beiden Systeme, dass die Probanden den Einfluss der Modi auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion unterschiedlich einschätzten. Die Abbildung 56 stellt diesbezüglich die abgegebenen Urteile auf einer 15-stufigen Skala dar. Der Wert „15“ entspricht erneut einer hohen Ausprägung auf dem Item. In der Grafik sind zudem die signifikanten Ergebnisse des zusätzlich durchgeführten t-Tests für unabhängige Stichproben integriert.

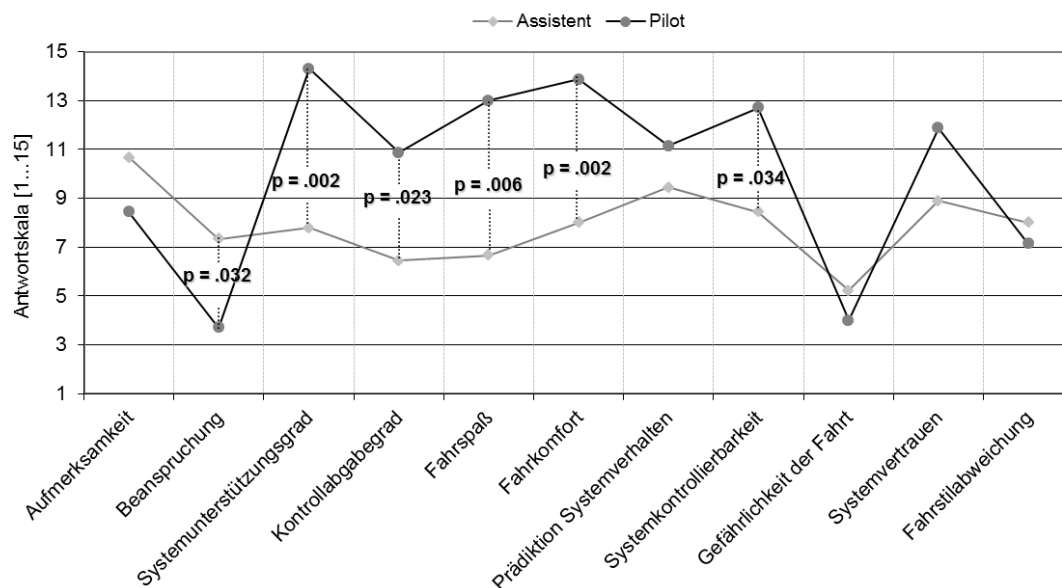


Abbildung 56: Subjektiven Bewertungen ( $M$ ) der Modi „Assistent“ und „Pilot“ in der Abschlussbefragung der Realfahrtstudie

Aus den Verläufen der Abbildung 56 wird insgesamt ersichtlich, dass die Fahrt im „Pilot-Modus“ subjektiv mit mehr Komfort und geringer Beanspruchung einherging. Die Probanden haben sich im Vergleich zum „Assistenten“ stärker aus der Rolle des Fahrzeugführers zurückgezogen, das System als kontrollierbar angesehen und den Unterstützungsgrad höher

bewertet. Die mit dem Modus „Pilot“ technisch umgesetzte Verteilung der Fahrzeugführungsaufgaben zwischen Fahrer und Automation spiegelt sich demnach auch im subjektiven Systemerleben wider. Hierbei zeichnet sich eine Wahrnehmung ab, die mit einer Entweder-oder-Situation vergleichbar ist. So scheinen die Probanden bei der Nutzung des Modus „Pilot“ für sich eine Rolle zu definieren, in der sie die Fahraufgabe an das System abgeben. Diese klar definierte Verschiebung der Fahrzeugführungskontrolle im Bewusstsein der Testpersonen könnte in Zusammenhang mit den erhaltenen Ergebnissen für die Transitionen in Richtung Automation stehen. Diesbezüglich besteht die Möglichkeit, dass der Grad der wahrgenommenen Einbindung des Fahrers in die Fahraufgabe die Art und Weise dessen Interaktion mit dem System in Übergabesituationen bestimmt. Da die Probanden beim Modus „Assistent“ nach wie vor Anteil an der Regelung des Fahrzeugs hatten, sollten sie demzufolge besser mit Transitionen umgehen können, die eine schrittweise Abgabe der Fahrzeugkontrolle bewirken. Im vorliegenden Fall entspricht dies dem indirekten Übergang über die Zwischenstufe ACC und erklärt diejenigen Ergebnisse, welche in diese Richtung weisen.

#### **5.5.1.1 Zwischenfazit: Transitionen in Richtung Automation**

In der Realfahrtstudie wurde angenommen, dass ein hoher „Grad der Kontrollverschiebung“ und „indirekte Transitionen“ in Richtung Automation zu Einbußen im Modusbewusstsein führen, die sich auf der Verhaltens- und Bewertungsebene niederschlagen (vgl. Kapitel 5.2).

Aus den Ergebnissen der Übergabesituationen in Richtung Automation lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- **Grad der Kontrollverschiebung:**

Der „Grad der Kontrollverschiebung“ hat keinen signifikanten Einfluss auf das Bewusstsein des Fahrers über den jeweiligen Systemmodus. Dies zeigte sich sowohl in der Aktivierungsdauer als auch in den subjektiven Analysen. Die einzige Ausnahme betrifft das Blickverhalten. Hier konnte eine Zunahme der mittleren Blickdauer sowie mehr Blicke über 1.5 s beim ersten Übergang von „Fahrer selbst“ auf den Modus „Assistent“ festgestellt werden. Die Probanden schauten folglich länger auf das Display mit der Systemzustandsanzeige, bevor sie die Funktion aktivierten. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in der rein deskriptiven Betrachtung der Aktivierungsdauer wider, bei der die Kontrollverschiebung auf „Assistent“ mit einer längeren Reaktionszeit einherging. Es lässt sich daher vermuten, dass die Kontrollverschiebung auf den Modus „Assistent“ für die Testpersonen weniger transparent als die auf „Pilot“ war. Anscheinend spielt hier nicht wie angenommen die Funktions-

komplexität des Systems eine entscheidende Rolle, sondern der Grad der Einbindung des Fahrers in die Funktion. So mussten die Probanden beim „Assistenten“ verstehen, wie die Aufgabenaufteilung zwischen Fahrer und System ist. Beim Modus „Pilot“ scheint dies mental eher mit einer „Entweder-oder-Situation“ verbunden zu sein. Gemäß dieser Logik fällt es den Fahrern leichter, das Systemangebot aus der manuellen Fahrt heraus einzuordnen und ihre Aufgabe in Relation zum Modus zu verstehen.

- **Indirekte Transition**

Die kognitive Differenzierungsfähigkeit von Teilfunktionen eines Systems wird nicht alleinig durch das Merkmal „indirekte Transition“ erschwert. Vielmehr scheint sich diese Art der Transition nur in Interaktion mit dem Merkmal „Grad der Kontrollverschiebung“ auszuwirken. Demgemäß spielt es eine Rolle, welcher Modus mit einem indirekten Übergang aktiviert wird.

- **Grad der Kontrollverschiebung\*Indirekte Transition**

Die angenommene Wechselwirkung der Merkmale „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Indirekte Transition“ kann anhand der analysierten Daten bestätigt werden. Es zeigte sich demnach auf subjektiver Ebene, dass die Aktivierung des Systemmodus „Pilot“ über die Zwischenstufe „ACC“ weniger transparent ist. Die Probanden sind sich zudem nicht sicher, welchen Modus sie gerade aktivieren und benötigen mehr Zeit, um sich darüber bewusst zu werden. Daher wünschen sie sicher eher eine direkte Aktivierung des Systems. Dies untermauert wiederum die bereits erwähnte „Entweder-oder-Wahrnehmung“ des Modus „Pilot“ seitens der Testpersonen.

Die subjektive Unsicherheit über das zu aktivierende System zeigte sich gleichfalls beim „Assistenten“, betraf jedoch den umgekehrten Fall. So präferierten die Testpersonen hier eher die „Indirekte Transition“. Diese Bevorzugung einer Aktivierung über Zwischenstufen deckt sich mit den erhaltenen Aktivierungsdauern, welche deskriptiv auf eine verzögerte Reaktion bei direktem Übergang hindeuten und mit den Daten zum Blickverhalten korrelieren.

- **Mode Confusion**

In der Realfahrtstudie konnte beim Übergang auf „Assistent“ in drei Fällen das Phänomen „Verwechslung von Systemmodi“ (Mode Confusion) festgestellt werden. Die Probanden erwarteten trotz der visuellen Rückmeldung in der Systemzustandsanzeige, dass sie den Modus „Pilot“ aktivieren. In Folge des falschen mentalen Modells nahmen sie anschließend die Hände vom Lenkrad und zeigten eine unangemessene



Handlung in Form eines „errors of commission“. Die funktionale Ähnlichkeit der Modi wirkte sich somit unabhängig davon, ob es einen Übergang zwischen den beiden Systemen gab, negativ auf das Modusbewusstsein aus. Daher wird geschlussfolgert, dass dieses Merkmal von Transitionen unbedingt bei der Gestaltung von Automation im Fahrzeug berücksichtigt werden muss. Es zeigt auch, dass Mode Confusion in Aktivierungsphasen auftreten kann und damit zu beachten ist.

Im Folgenden werden die Befunde für die Transitionen in Richtung Fahrer dargestellt.

### **5.5.2 Zweiter Ergebnisblock: Transitionen in Richtung Fahrer**

Für diesen Ergebnisteil wurden insgesamt 40 Übernahmesituationen in Richtung Fahrer analysiert. Jene ergaben sich aus der Anzahl der Kontrollverschiebungen aus den Modi „Assistent“ und „Pilot“ auf „Fahrer selbst“ sowie den Transitionen auf die Zwischenstufe „ACC“, welche infolge der Teilrückgabe der Kontrolle an den Fahrer einem indirekten Übergang entspricht (vgl. Abbildung 51). In die univariaten bzw. multivarianten Analysen gingen als feste Faktoren der „Grad der Kontrollverschiebung“ und die „Art der Transition“ ein (vgl. Abbildung 43). Dabei lag der Fokus zunächst auf den Daten, die aus der zweiten und vierten Transitionssituation resultierten (vgl. Kapitel 5.3.6). Ausgewertet wurden zuerst die Übernamedauer als Maß der Reaktion des Fahrers, dann die subjektiven Angaben aus den Fragebögen und abschließend das Blickverhalten anhand der Videodaten (vgl. Kapitel 5.4.2). Die Ergebnisdarstellung erfolgt für die hier betrachteten Merkmale von Transitionssituationen gleichzeitig und nicht nach Haupt- und Interaktionseffekt abschnittsweise separiert.

#### **Grad der Kontrollverschiebung & Indirekte Transition**

Bei der Analyse der **Fahrdaten** (vgl. Übernamedauer in Tabelle 20) war von Interesse, ob sich die mittleren Zeitdauern von der Übernahmeaufforderung des Systems bis zur ersten Reaktion des Fahrers zwischen den Systemmodi „Assistent“ und „Pilot“ (Grad der Kontrollverschiebung) sowie in Abhängigkeit der Art der Transition voneinander unterscheidet (vgl. Kapitel 5.2). Verzögerte bzw. markante Reaktionen könnten darauf hindeuten, dass dem Fahrer die zu differenzierenden Teilfunktionen nicht transparent sind bzw. das Systembewusstsein durch die Charakteristik des Übergangs gemindert wird (vgl. Tabelle 14). Zudem wurden Wechselwirkungseffekte untersucht, deren postulierte Auswirkungen vor allem die indirekte Transition auf den Modus „Pilot“ betrafen (vgl. Tabelle 15). Da die relevanten Kennwerte für die Analyse der Fahrdaten (vgl. Tabelle 19) die Voraussetzungen der Normalverteilung ( $p = .80$ ) sowie der Varianzhomogenität ( $p = .51$ ) erfüllen, konnte die Überprüfung mittels varianzanalytischer Verfahren stattfinden.

Die Berechnungen der **Übernahmedauer** zeigten, dass keine signifikanten Effekte für den Faktor „Art der Transition“ ( $F[1, 27] = 1.18$ ;  $p = .288$ ;  $\eta^2 = .042$ ) und die Interaktion zum „Grad der Kontrollverschiebung“ ( $F[1, 27] = 0.57$ ;  $p = .378$ ;  $\eta^2 = .029$ ) bestehen. Es ergab sich allerdings ein tendenzieller Effekt ( $p < .10$ ) für den Faktor „Grad der Kontrollverschiebung“ ( $F[1, 27] = 3.37$ ;  $p = .077$ ;  $\eta^2 = .011$ ). Die Verteilung der Werte zeigte demgemäß, dass die „Pilot-Fahrer“ tendenziell schneller reagierten als die „Assistent-Fahrer“ (vgl. Abbildung 57, links oben). Sie übernahmen circa 0.8 s früher die Kontrolle über das Fahrzeug ( $M_{\text{Pilot}} = 1.1$  s;  $SD = 0.65$  s vs.  $M_{\text{Assistent}} = 1.9$  s;  $SD = 1.21$  s). Obwohl diese Probanden zumeist „Hands-off“ fuhren, scheint die Dringlichkeit der Reaktion für sie einen anderen Stellenwert zu haben als für diejenigen Testpersonen, welche vor dem Übergang auf „Assistent“ mitlenkten.

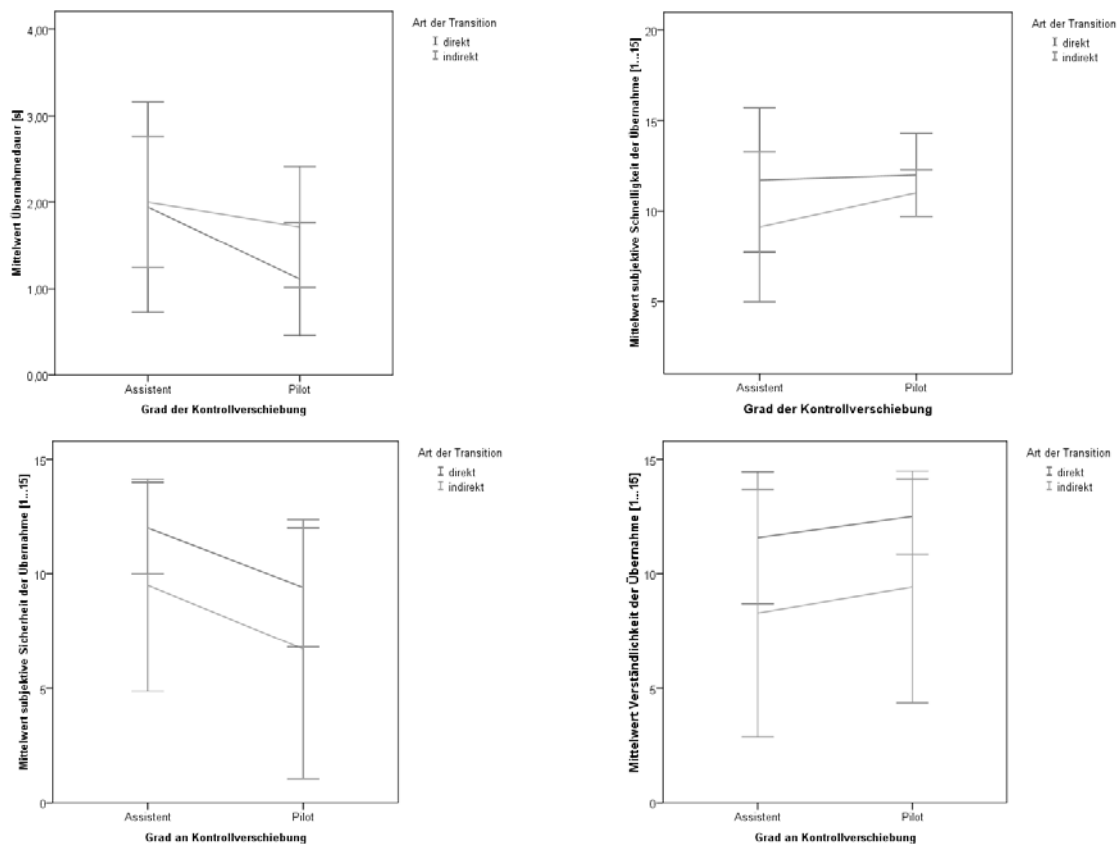


Abbildung 57: Mittlere Übernahmedauer in s (links oben), wahrgenommene Schnelligkeit (rechts oben), subjektive Sicherheit (links unten) sowie Verständlichkeit der Übernahme in Abhängigkeit des „Grads der Kontrollverschiebung“ und der „Art der Transition“

Allerdings fällt in der Abbildung 57 (links oben) zudem auf deskriptiver Basis auf, dass sich die Übernahmedauern vom Modus „Pilot“ in Abhängigkeit der Charakteristik der Transition unterscheiden. Diesbezüglich geht aus der rein grafischen Analyse hervor, dass die Probanden bei der direkten Transition im Mittel nach 1.11 s reagierten und bei der indirekten nach 1.71 s. Laut den Fahrdaten bremsen die Testpersonen im ersten Fall, im zweiten lenkten

oder bremsen sie. Da anhand der Videodaten keine Auffälligkeiten in der Fahrsituation selbst feststellbar waren, könnte dies dafür sprechen, dass sich einige der Versuchspersonen beim Übergang auf „ACC“ nicht sicher darüber waren, welche Fahrfunktionen sie von der Automation zurückerhalten haben. Folglich fiel ihnen die kognitive Differenzierung der Systemzustände anscheinend schwerer und erforderte daher mehr Zeit.

Die vorausgehende Überlegung bestätigte sich nur bedingt in den **subjektiven Daten** zur Wahrnehmung der Transition seitens der Probanden. Diesbezüglich stellt die Abbildung 57 die Ergebnisse zur erlebten Schnelligkeit (rechts oben) und Sicherheit (links unten) bei der Übernahme sowie zur Verständlichkeit der Transition (rechts unten) dar. Die Bewertungen erfolgten hierbei auf einer 15-stufigen Skala, bei der „1“ einer geringen und „15“ einer hohen Ausprägung auf dem Item entsprach.

Demgemäß zeigten sich in der varianzanalytischen Betrachtung des Items „subjektive Schnelligkeit der Übernahme“ (Abbildung 57, rechts oben) keine signifikanten Effekte: Grad der Kontrollverschiebung ( $F[1, 28] = 0.93$ ;  $p = .332$ ;  $\eta^2 = .032$ ), „Art der Transition“ ( $F[1, 28] = 2.58$ ;  $p = .120$ ;  $\eta^2 = .084$ ), „Grad der Kontrollverschiebung\* Art der Transition“ ( $F[1, 28] = 0.51$ ;  $p = .483$ ;  $\eta^2 = .018$ ). Betrachtet man analog dazu die Urteile zur subjektiv wahrgenommenen Sicherheit bei der Übernahme (vgl. Abbildung 57, links unten), fühlten sich die Versuchspersonen bei dem Übergang aus dem Modus „Pilot“ und bei „indirekten Transitionen“ unsicherer. In der inferenzstatistischen Analyse zeigte sich demgemäß auch ein tendenziell signifikantes Ergebnis für die „Art der Transition“ ( $F[1, 28] = 3.46$ ;  $p = .073$ ;  $\eta^2 = .110$ ) und den Faktor „Grad der Kontrollverschiebung“ ( $F[1, 28] = 3.73$ ;  $p = .063$ ;  $\eta^2 = .118$ ). Bei der Unsicherheit der „Pilot-Fahrer“ könnte eine Rolle gespielt haben, dass sie die Hände zum Zeitpunkt der Transition nicht am Lenkrad hatten. Sie bewerteten die Übernahme infolgedessen auch als kritischer. Die Art der Transition (vollständig oder nur Teilabgabe) war hier nicht entscheidend für die Beurteilung des Übergangs aus „Pilot“ (Interaktionseffekt:  $F[1, 28] = 0.04$ ;  $p = .947$ ;  $\eta^2 = .000$ ). „Indirekte Transitionen“ sind jedoch anscheinend generell mit einem geringeren Sicherheitsempfinden in Übernahme-situationen verbunden ( $M_{\text{direkt}} = 10.47$ ;  $SD_{\text{direkt}} = 2.6$  vs.  $M_{\text{indirekt}} = 8.20$ ;  $SD_{\text{indirekt}} = 5.1$ ). So ergab sich gleichfalls für die Bewertungen zur Verständlichkeit der Transition (vgl. Abbildung 57, rechts unten), dass die Probanden die vollständige Übernahme der Fahrzeugkontrolle besser verstanden haben als die indirekte Rückgabe auf den Zwischenmodus „ACC“ ( $F[1, 27] = 5.12$ ;  $p = .032$ ;  $\eta^2 = .159$ ). Zudem zeigte sich in der Nachbefragung, dass sich die Testpersonen unabhängig vom Modus eine vollständige Deaktivierung der Automation bei notwendigen Systemabwürfen wünschen. Hintergrund dessen war zumeist die bessere Nachvollziehbarkeit und Eindeutigkeit der Kontrollübergabe. Für die Variable „Verständlichkeit der Transition“

konnten darüber hinaus keine weiteren signifikanten Effekte gefunden werden (Haupteffekt „Grad der Kontrollverschiebung“:  $F[1, 27] = 0.543$ ;  $p = .467$ ;  $\eta^2 = .020$  und Interaktionseffekt:  $F[1, 27] = 0.01$ ;  $p = .940$ ;  $\eta^2 = .000$ ).

In Ergänzung zu den bereits dargestellten Ergebnissen zeigte die Analyse der **Videodaten**, dass im Gegensatz zu den Transitionen in Richtung Automation (vgl. Kapitel 5.5.1) weniger häufig und kürzer auf das Display mit den Systemzustandsanzeigen geschaut wurde. Es ergaben sich zudem keine Blicke über 1.5 s Dauer. Über alle Probanden hinweg, schauten  $N = 15$  Fahrer einmal, zwei Versuchsteilnehmer zweimal und eine Person gar nicht auf das Display. Bei der Auswertung der Videodaten fiel darüber hinaus auf, dass kaum ein Proband nach der Übernahme die Anzeige zur Verifizierung des momentan aktiven Systemmodus nutzte ( $N = 5$ ). Der Fokus der Aufmerksamkeit lag demnach vorrangig auf der Straße bzw. der Fahrsituation. Das visuelle Feedback spielte somit eine untergeordnete Rolle. Auf Basis der Nachbefragungsdaten scheinen eher die haptischen bzw. kinästhetischen Rückmeldungen des Fahrzeugs an Bedeutung zu gewinnen. So gaben die Probanden an, sich eher auf die Fahrzeugreaktionen konzentriert zu haben. Die Gründe hierfür sind in der Beanspruchung des Fahrers bzw. dessen kapazitive Auslastung bei Systemabwürfen zu suchen. So gehen mit Rückgaben der Fahrzeugkontrolle höhere Anforderungen an den Fahrzeugführer einher, die bezüglich des generierten Beanspruchungsniveaus von den eher zeitunkritischen Systemaktivierungsprozessen differieren. Dabei ist zu beachten, dass gleichfalls das Übernahmesignal (Warnton) die Art und Weise der Reaktionen der Probanden verstärkt haben kann. So führt die Assoziation des akustischen Signals mit einer kritischen Situation zu einem eher fahraufgabenzentrierten Blickverhalten.

Die beschriebene Verteilung der Blickdaten ist in Abbildung 58 nochmals grafisch dargestellt. Deren inferenzstatistische Auswertung mittels Kreuztabellen sowie varianzanalytischen Verfahren zeigte allerdings keine signifikanten Unterschiede für die Haupt- und Interaktionseffekte (vgl. Anhang). Die Gründe dafür liegen vor allem in der geringen Fallzahl und den äußerst marginalen Unterschieden zwischen den beiden Merkmalen an Transitionen.

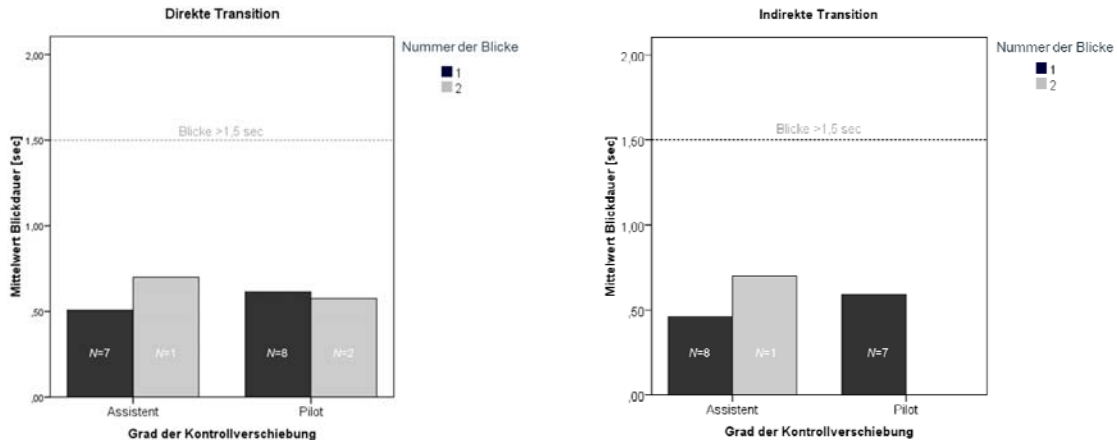


Abbildung 58: Mittlere Blickdauer [s] in Relation zur Nummer des Blickes für die direkten (links) und indirekten (rechts) Transitionen auf „Assistent“ bzw. „Pilot“

In Ergänzung zu den dargestellten Ergebnissen zu Transitionen in Richtung Fahrer fiel in der Realfahrtstudie auf, dass es hier zu keinen Verwechslungen in Form von Mode Confusion zwischen „Assistent“ und „Pilot“ kam. Anscheinend treten derartige Effekte nur bei der Aktivierung der Systeme auf (vgl. Kapitel 5.5.1). Jene Aussage ist in weiteren empirischen Untersuchungen zu prüfen.

#### 5.5.2.1 Zwischenfazit: Transitionen in Richtung Fahrer

In der Realfahrtstudie wurde angenommen, dass ein hoher „Grad der Kontrollverschiebung“ und „indirekte Transitionen“ in Richtung Fahrer zu Einbußen im Modusbewusstsein führen, die sich auf der Verhaltens- und Bewertungsebene niederschlagen (vgl. Kapitel 5.2).

Aus den Ergebnissen der Übernahme-situationen in Richtung Fahrer lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- **Grad der Kontrollverschiebung:**

Der Grad der Kontrollverschiebung zeigt einen signifikanten Einfluss auf der Verhaltens- und der Bewertungsebene. Entgegen der Annahme konnte allerdings festgestellt werden, dass die Übernahme aus dem Modus „Pilot“ schneller erfolgt als aus dem Modus „Assistent“. Obwohl sich die Testpersonen unsicherer fühlten, scheint der Grad der Entbindung des Fahrers aus der Fahraufgabe nicht die entscheidende Größe zu sein. Vielmehr spielen hierbei zwei andere Faktoren eine wichtige Rolle: Zum einen bewirkt die Übernahme der Kontrolle aus einer „Hands-off-Fahrt“ eine andere Dringlichkeit der Situation. Zum anderen könnte beim Verständnis des Fahrers für die Transition erneut eine Rolle spielen, dass der Modus „Pilot“ mit

einer „Entweder-oder-Situation“ verbunden wird. Folglich entspricht es der Erwartung des Fahrers, dass er in einer Übernahmesituation die komplette Kontrolle über das Fahrzeug erhält.

- **Indirekte Transition**

Die kognitive Differenzierungsfähigkeit von Teilfunktionen eines Systems wird in Übernahmesituationen durch „indirekte Transitionen“ beeinträchtigt. So führte der Übergang auf die Zwischenstufe „ACC“ dazu, dass sich die Probanden subjektiv unsicherer fühlten und die Transition als nicht verständlich einstufen. Die Bildung eines angemessenen Bewusstseins für den aktuellen Modus wird folglich durch den Übergang auf Teilfunktionen der Automation erschwert. Der Fahrer ist hierbei mehr gefordert um zu verstehen, welche Aufgabenverteilung zwischen ihm und der Automation vorliegt. In dem Zusammenhang ist interessant, dass sich die Testpersonen kaum Feedback aus der Systemzustandsanzeige holen, sondern sich eher auf die kinästhetischen Rückmeldungen des Fahrzeugs konzentrieren. Sie reagieren zudem unabhängig von der Art der Transition gleich schnell. Folglich bildet sich das Bewusstsein für die aktuelle Situation erst nach der Übernahme heraus. Weiterhin wünschen sie sich in der Abschlussbefragung eine vollständige Deaktivierung der Funktion, unabhängig vom aktuellen Systemmodus.

- **Grad der Kontrollverschiebung\*Indirekte Transition**

Im Gegensatz zu den Erkenntnissen der Transitionen in Richtung Automation, kann die angenommene Wechselwirkung der Merkmale „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Indirekte Transition“ nicht bestätigt werden. Es zeigt sich allerdings auf deskriptiver Ebene ein Effekt in der erwarteten Richtung. So ging aus den Analysen der Übernahmedauer hervor, dass die Probanden beim indirekten Übergang aus dem Modus „Pilot“ mehr Zeit benötigten. Anscheinend ist ihnen in der Situation nicht transparent, welcher Systemzustand gerade vorliegt. Analog zu den Ergebnissen der Art der Transition fällt ihnen die Differenzierung der Aufgabenverteilung schwerer. Ein weiterer Faktor könnte hier erneut sein, dass der Modus „Pilot“ mental mit einer „Entweder-oder-Logik“ verbunden ist. Der Rückgang auf eine Zwischenstufe der Automation entspricht daher nicht den Erwartungen, welche die Probanden vom System haben. Bei der indirekten Transition aus dem Modus „Assistent“ ließen sich entgegen der Annahme keine derartigen Auffälligkeiten finden.

- **Mode Confusion**

Im Unterschied zu den Transitionen in Richtung Automation, konnten bei den Übergängen in Richtung Fahrer keine „Automation Surprises“ in Form von Mode Confusion oder Mode Errors gefunden werden. Demnach scheinen Systemaktivierungsphasen eher sensitiv für derartige Effekte zu sein. Es ist anzunehmen, dass die Testpersonen hierbei eine gewisse Erwartung an den Modus haben, den sie aktivieren. Befinden sich funktional einander ähnliche Systeme im Fahrzeug, sind Verwechslungen sehr wahrscheinlich. In dem Zusammenhang ist allerdings zu berücksichtigen, dass es in der vorliegenden Studie kein System gab, welches dem Modus „ACC“ funktional ähnlich ist. Demgemäß hätte eine Transition von „Fahrer selbst“ auf einen „Tempomaten“ eventuell vergleichbare Auswirkungen haben können.

Im folgenden Kapitel 5.6 wird unter Berücksichtigung der Ergebnisse beider Richtungen von Transitionen ein zusammenfassendes Fazit zu den Zielen und Fragestellungen der ersten Studie gezogen. Die inhaltliche und methodische Diskussion der Befunde findet im Kapitel 7 dieser Arbeit statt. Dort werden die Ergebnisse der Realfahrtstudie mit den Erkenntnissen aus der Fahrsimulatoruntersuchung (vgl. Kapitel 6) verknüpft und gemeinsam erörtert.

## **5.6 Zusammenfassendes Fazit**

Das übergeordnete Ziel der Realfahrtstudie war, erste Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie der Fahrer mit unterschiedlich stark automatisierten Fahrfunktionen interagiert, die gleichzeitig im Fahrzeug verfügbar sind. Folglich orientierte sich die Untersuchung an einem mehrstufigen Automationsansatz, der im vorliegenden Fall die Systemmodi „Fahrer selbst“, „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ umfasste. Im Vordergrund stand die Analyse der Auswirkungen von ausgewählten Übernahme- und Übergabesituationen auf das Fahrerverhalten und die Fahrerbewertungen. Auf explorativer Basis wurde untersucht, ob es Übergänge gibt, die deutlich von den Erwartungen des Nutzers abweichen, intransparent sind oder sogar nicht intendierte Automationseffekte in Form von Mode Confusion bzw. Mode Errors hervorrufen. Hierfür fand die Integration von Transitionssituationen statt, die mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für derartige Folgeerscheinungen einhergehen. Diese bezogen sich in der ersten Studie auf Übergänge, die sich im „Grad der Kontrollverschiebung“ und in der „Richtung der Transition“ unterschieden sowie „Indirekte Transitionen“ umfassten. Sie wurden in einem Wizard-of-Oz Fahrzeug umgesetzt und anhand von 20 Probanden evaluiert.

Auf Basis der Ergebnisse kann für die betrachteten Merkmale von Transitionssituationen zwischen Fahrer und Automation (vgl. Abbildung 35 und Tabellen 16, 17) das zusammen-

fassende Zustandsdiagramm in Abbildung 59 abgeleitet werden. Es kennzeichnet innerhalb des ausgewählten Automationsansatzes geeignete und eher ungeeignete Übergänge im Fahrkontext. Sie werden nachfolgend erläutert.

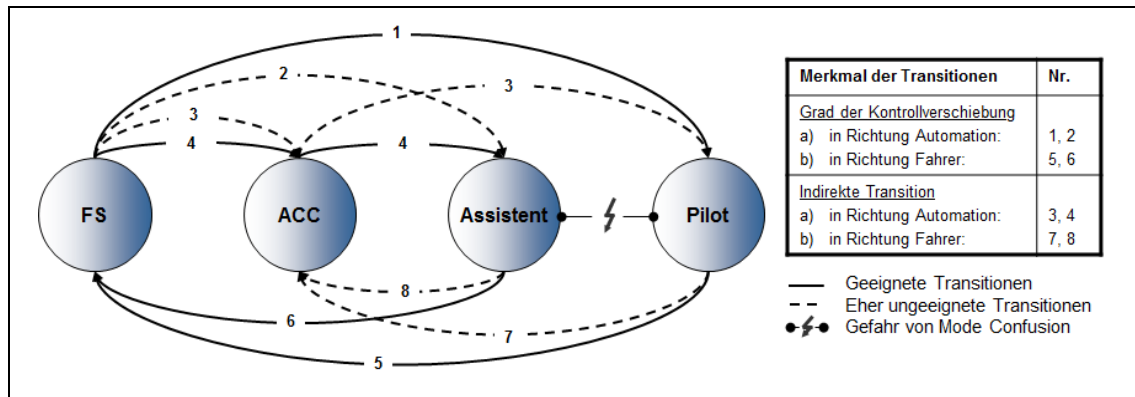


Abbildung 59: Gestaltungsempfehlungen für Transitions in den betrachteten Übergabe- und Übernahme-situationen der ersten Studie in Form eines Zustandsdiagramms

Gemäß Abbildung 59 kann auf der Grundlage von Fahr-, Video- und Fragebogendaten für **Transitions in Richtung Automation** empfohlen werden, dass der Systemmodus „Pilot“ direkt und der Systemmodus „Assistent“ über die Zwischenstufe ACC aktiviert werden sollten (vgl. Kapitel 5.5.1). Diese Schlussfolgerung resultiert insbesondere aus den Erkenntnissen zur Wechselwirkung der Transitionsmerkmale „**Grad der Kontrollverschiebung**“ und „**Indirekte Transition**“. So bestätigte sich hierbei, dass ein hoher Grad der Kontrollverschiebung bei indirekten Übergängen den Fahrer stärker in der Differenzierung von Teilfunktionen der Automation fordert (vgl. Tabelle 15). Dies wurde primär anhand von subjektiven Aussagen deutlich. So bewerteten die Probanden „indirekte Transitions“ auf den Modus „Pilot“ als intransparent und waren sich unsicher über das aktivierte System. Darüber hinaus gaben sie an subjektiv mehr Zeit zu benötigen, um sich über den Modus bewusst zu werden. Diese Auswirkung der Transition scheint dabei mit der mentalen Einbettung der Fahrfunktion zusammenzuhängen. So zeigt sich, dass der Modus „Pilot“ von den Probanden mit einer „Entweder-oder-Logik“ einhergeht. Gibt der Fahrer die Kontrolle an ein derartig hochautomatisiertes System ab, so will er dies auf direktem Wege tun. Beim Modus „Assistent“, bei dem der Fahrer noch Anteile der Fahraufgabe übernehmen muss, passt hingegen die Aktivierung der Funktion über Zwischenstufen der Automation eher zum mentalen Systemmodell. Die damit einhergehende Kompatibilität zwischen Nutzer- und Systemmodell, führt in der Folge zu schnelleren Reaktionen bei der Aktivierung und spiegelt sich gleichfalls im Blickverhalten wider. Unter Einbezug der Ergebnisse zum „**Grad der Kontrollverschiebung**“ konnte demgemäß beim Modus „Assistent“ festgestellt werden, dass die Fahrer länger auf die Systemzustandsanzeige schauten. Anscheinend benötigen sie mehr Zeit, um sich ein Bewusstsein über den Modus zu verschaffen. Dabei könnten zwei Faktoren eine wichtige Rolle spielen:



Zum einen muss der Fahrer verstehen, welche Aufgaben der Fahrzeugführung er selbst und welche die Automation übernimmt. Entgegen der Annahme (vgl. Tabelle 13), ist folglich weniger die Funktionskomplexität, sondern eher der Grad der Einbindung des Fahrer in die Funktion bedeutsam. Zum anderen kommt die Schwierigkeit dazu, dass es in dem Fahrzeug eine Funktion gibt, die dem Modus funktional sehr ähnlich ist. Die Probanden müssen demnach zusätzlich abgrenzen, welcher der beiden Modi mit welchem Funktionsumfang aktiviert wird. Die damit einhergehende Herausforderung äußerte sich in der Realfahrtstudie im Auftreten von **Mode Confusion**. So nahmen  $N = 3$  Testpersonen fälschlicherweise an, dass sie den Modus „Pilot“ eingeschaltet haben und gaben die komplette Querführung an das Fahrzeug ab. Die funktionale Ähnlichkeit der beiden Systeme wirkte sich somit negativ auf die Handlungen des Fahrers aus. Sie führte zu **Mode Errors** in Form von „errors of commision“ und zeigt deutlich, welche Folgen die erwartungsinkonforme Gestaltung von Transitionen hat. Sie gibt zudem einen Hinweis darauf, wie sich die verfügbaren Automationsstufen im Fahrzeug zusammensetzen sollten. So sind aufeinander aufbauende Systeme mit ähnlichem Funktionsumfang eher zu vermeiden. Wie im Untersuchungskonzept der Arbeit angenommen (vgl. Kapitel 4.2.4), scheint das Merkmal „Ähnlichkeit von Systemmodi“ daher eine wichtige Stellgröße für Mode Awareness zu sein.

Betrachtet man ergänzend dazu die Ergebnisse zu **Transitionen in Richtung Fahrer** fällt auf, dass sich Übernahme-situationen von der Abgabe der Kontrolle an die Automation unterscheiden (vgl. Abbildung 59). So konnten hier keine signifikanten Interaktionseffekte der Faktoren „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Art der Transition“ gefunden werden (vgl. Hypothesen aus Tabelle 15). Es zeigten sich hingegen isolierte Wirkungen der beiden Faktoren auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. Demgemäß ergab die inferenzstatistische Analyse zum Merkmal „**Indirekte Transition**“, dass sich die Probanden bei Übergängen auf Zwischenstufen der Automation subjektiv unsicherer über den momentan aktiven Modus waren und die Transition als weniger gut verständlich einstufen. Zudem wünschten sich die Testpersonen in der Nachbefragung eine vollständige Deaktivierung des Systems. Wie hypothetisch angenommen (vgl. Tabelle 14), wird das Bewusstsein über den aktuellen Systemmodus durch den Übergang auf Teilfunktionen der Automation erschwert. Der Fahrer ist mehr gefordert um zu verstehen, welche Aufgabenverteilung zwischen ihm und dem aktiven System vorliegt. Falsche Annahmen könnten hier analog zu den Erkenntnissen aus Transitionen in Richtung Automation zu unangemessenen oder ausbleibenden Reaktionen führen. Wesentlich ist dabei, dass sich die Testpersonen im vorliegenden Versuch kaum Feedback aus der Systemzustandsanzeige holten, sondern sich auf die kinästhetische Rückmeldung des Fahrzeugs konzentrierten. In Ergänzung dazu zeigte sich für das Merkmal „**Grad der Kontrollverschiebung**“, dass die Probanden schneller auf die

Übernahmeaufforderung aus dem Modus „Pilot“ reagierten. Entgegen der Annahme (vgl. Tabelle 14) scheint dabei weniger der Grad der vorausgehenden Entbindung der Fahraufgabe entscheidend zu sein, sondern erneut die mentale Wahrnehmung des Modus als ein „On-Off-System“. Der Fahrer erwartet bei der Deaktivierung, dass er die komplette Fahrzeugkontrolle zurückerhält.

Bezüglich der **übergreifenden Fragen** (vgl. Kapitel 5.2) ist auf Basis der Ergebnisse der Realfahrtstudie noch keine Aussage über eine maximale Anzahl an Systemen möglich, die der Fahrer bei mehrstufiger Automation differenzieren kann. Es lässt sich jedoch festhalten, dass es entscheidend ist, ob die Fahrfunktionen einander ähnlich sind. Einbußen im Modusbewusstsein sind diesbezüglich umso wahrscheinlicher, je geringer die Abgrenzbarkeit der Systeme ist. Zudem scheint es mit Zunahme des Automationsgrades empfehlenswert, die einzelnen Zustandsübergänge direkter zu gestalten. Hierbei ist das mentale Modell des Nutzers vom System wichtig, welches über den wahrgenommenen Funktionsumfang gleichfalls eine Erwartung zur Interaktion mit diesem prägt (Entweder-oder-Logik). In dem Zusammenhang spiegeln sich erwartungsinkonforme Übergänge zwischen Fahrer und Automation vor allem in subjektiven Einschätzungen wider. Teilweise konnten sie gleichfalls in der Art sowie Dauer der Reaktion auf die Transition aufgelöst werden. So zeigten sich einerseits Verzögerungen in der Aktivierung von Systemen sowie im Blickverhalten auf die Systemzustandsanzeige. Andererseits kann anhand der Reaktionen nach der Übernahme festgestellt werden, ob die Handlung des Fahrers mit dem aktuellen Systemmodus und dessen Funktionsumfang übereinstimmt. In dem Zusammenhang ist anzumerken, dass mit Hilfe der erhobenen Daten in der Realfahrtstudie erste Ableitungen zur nutzerzentrierten Gestaltung von Übergabe- und Übernahme-situationen möglich waren. Jene fokussieren eine bessere Passung des mentalen Fahrermodells zu den Automationsstufen und sollen „Automation Surprises“ verhindern. Diesbezüglich kristallisiert sich die „Ähnlichkeit von Systemmodi“ analog zum Luftfahrtbereich als zentral im Fahrkontext heraus.

### **Ableitungen für die Folgeuntersuchung**

Für die zweite Studie dieser Arbeit (vgl. Kapitel 6) lassen sich folgende Punkte auf Grundlage der Erkenntnisse und des Untersuchungsansatzes der Realfahrtstudie ableiten. Sie spiegeln den Optimierungsbedarf der vorliegenden Untersuchung wider, auf den einerseits bei der Ergebnisdarstellung Bezug genommen wurde (vgl. Kapitel 5.6) und der andererseits in der inhaltlichen bzw. methodischen Diskussion aufgegriffen wird (vgl. Kapitel 7):

- Einbindung und Analyse des Merkmals „**Ähnlichkeit von Systemmodi**“ in Transitionen in Richtung Fahrer und Automation
  - Es finden Übergänge vom Modus „Assistent“ in „Pilot“ und umgekehrt statt
- Erweiterte Einbindung des **Systemmodus „ACC“** in den Automationsansatz für differenzierte Aussagen zur Auswirkung des „Grads der Kontrollverschiebung“ und von „Indirekten Transitionen“:
  - Es kann zusätzlich nur der Systemmodus „ACC“ aktiviert werden.
  - Es findet zusätzlich eine Übergang von „ACC“ auf „Fahrer selbst“ statt.
  - Es wird geprüft, ob eine vollständige Deaktivierung einer automatisierten Funktion mit anschließendem Übergang auf ACC, die negativen Effekte von „indirekten Transitionen“ mindern kann.
- Einbettung der Transitionen in systematisch variierte Übergangssituationen in einem kontrollierten **Versuchssetting**, um validere Aussagen zu treffen
  - Nutzung eines Fahrsimulators mit triggerbasierter Ereignisauslösung
- Ermöglichung einer längerer **Nutzungsdauer der Systemmodi**, um erste Gewöhnungseffekte in die Analysen einzubinden
- Durchführung der Evaluation anhand einer größeren **Stichprobe**
- Erweiterung der **Datenbasis** zur detaillierten Bewertung der Effekte
  - Erfassung von biophysiological Parametern
  - Analyse der Art der Reaktion (qualitativ & quantitativ) auf Transitionen

## 6 Studie II: Simulatorfahrt auf der Autobahn mit erweiterten Transitionen

In diesem Kapitel findet die Darstellung der zweiten Studie der vorliegenden Arbeit statt. Schwerpunktmäßig wird zunächst auf die Untersuchungsziele (Kapitel 6.1), auf die Hauptfragestellungen (Kapitel 6.2) und auf die methodischen Gesichtspunkte (Kapitel 6.3) eingegangen. Im Abschnitt 6.4 folgt eine Beschreibung der erhobenen Daten, die in den Ergebnisteil der Fahrsimulatoruntersuchung überführen (Kapitel 6.5). Den Abschluss des Kapitels 6 bildet ein zusammenfassendes Fazit zur zweiten Studie (Kapitel 6.6). Dieses wird im Kapitel 7 in die inhaltliche und methodische Diskussion der Ergebnisse beider Untersuchungen der vorliegenden Arbeit eingebunden. Im Vordergrund steht hier die kritische Analyse der Erkenntnisse unter Beachtung des Forschungsschwerpunktes der Arbeit (vgl. Kapitel 4).

### 6.1 Ziele

Analog zur Realfahrtstudie (vgl. Kapitel 5), zielt die zweite Untersuchung auf die Erkenntnisgewinnung zu Übernahme- und Übergabesituationen zwischen unterschiedlich stark automatisierten Fahrfunktionen ab. Dieses betrifft erneut die Systemmodi „Fahrer selbst“ (FS), „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ (vgl. Kapitel 4.2.2). Im Gegensatz zum Feldexperiment wird für die Analyse des Fahrerverhaltens und der Fahrerbewertungen jedoch eine Testumgebung gewählt, welche die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion nicht unter realen, sondern unter **simulierten Versuchsbedingungen** betrachtet. Dies ermöglicht die Integration von Transitionssituationen, die sich zum einen ereignisgebunden und systematisch triggern lassen. Zum anderen ist die Nachbildung **zeitkritischer Übernahme-situationen** möglich, welche gemäß Tabelle 7 sensitiv für Mode Confusion oder Mode Errors sind. Darüber hinaus kann auf jene Weise die Dynamik des Verkehrsgeschehens gesteuert und damit verbundene Störvariablen kontrolliert werden. Dies gewährleistet wiederum ein hohes Maß an interner Validität. Zudem bietet es die Möglichkeit, die Datenbasis zur Analyse der Auswirkungen der Transitionen um störanfälligere Parameter wie **biophysiological Kennwerte** zu ergänzen und somit Erkenntnisse zum kognitiven bzw. emotionalen Beanspruchungserleben zu erhalten.

Gemeinsame Basis beider Studien ist die Frage, ob es Übergänge zwischen Fahrer und Automation gibt, die deutlich von den Erwartungen des Nutzers abweichen oder sogar nicht intendierte Automationseffekte in Form von Mode Confusion bzw. Mode Errors hervorrufen. Hierfür findet erneut die Integration von Transitionssituationen statt, die mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für derartige Folgeerscheinungen einhergehen (vgl. Kapitel 4.2.4). Jene beziehen sich in der zweiten Studie wiederum auf Übergänge, die durch einen unterschiedlich hohen **Grad der Kontrollverschiebung** und durch **indirekte Transitionen** gekenn-

zeichnet sind. Der Systemmodus „ACC“ wird allerdings stärker in die resultierenden Übergänge in **Richtung Automation bzw. Fahrer** eingebunden. Des Weiteren ergänzt die Fahr-simulatoruntersuchung das Merkmal „**Ähnlichkeit von Systemmodi**“ in den analysierten Transitionssituationen.

Folglich knüpft die vorliegende Studie an die Realfahrtuntersuchung an und integriert zudem erweiterte Übergabe- sowie Übernahmeszenarien. Zur Gewinnung zusätzlicher Erkenntnisse zur Thematik Automation und Transition im Fahrzeug ist außerdem Ziel, die **Nutzungsdauer** der einzelnen Systemmodi vor den jeweiligen Übergängen zu erhöhen sowie die Analysen an einer **größeren Stichprobe** durchzuführen.

## 6.2 Fragestellung und Hypothesen

Gemäß den genannten Zielen analysiert die zweite Studie innerhalb eines vierstufigen Automationsansatzes Transitionssituationen, welche durch die Merkmale „**Grad der Kontrollverschiebung**“, „**Indirekte Transition**“, „**Ähnlichkeit von Systemmodi**“ und „**Richtung der Transition**“ charakterisiert sind. Ferner bindet die Untersuchung die **Zeitkritikalität** als Charakteristik der transitionsauslösenden Situation in die Übergänge ein (vgl. Kriterium 10 in Tabelle 7). Sie umfasst somit alle Anwendungsfälle, die im Kapitel 4.3 aus technischer sowie psychologischer Sicht als Rahmen der vorliegenden Arbeit abgeleitet wurden (vgl. Abbildung 26 und 27) und zu Automation Surprises führen können.

Unter Einbezug der Erkenntnisse aus der ersten Untersuchung stellt sich bezüglich des „Grads der Kontrollverschiebung“ die Frage, ob wiederum eher der kognitive Aufwand bei der Differenzierung noch zu übernehmender Anteile der Fahraufgabe und weniger das Ausmaß an Automation selbst entscheidend ist (vgl. Kapitel 5.6). Demgemäß ist offen, ob der Modus „Pilot“ erneut als ein Gesamtsystem mit einer „Entweder-oder-Verschaltung“ wahrgenommen wird und daher „indirekte Transitionen“ über Zwischenstufen der Automation für den Fahrer intransparenter sind. Dementgegen gilt es zu prüfen, ob der Fahrer bei Systemmodi, in denen er noch Anteile der Fahraufgabe übernehmen muss, mehr Zeit benötigt, um sich ein Bewusstsein über die Funktionsaufteilung zu verschaffen. Mit Bezug auf die Art der Transition sollten hier indirekte Übergänge den Verständnisaufbau des Fahrers unterstützen. Dabei ist zu klären, ob sich diese erwarteten Effekte sowohl bei Transitionen in Richtung Fahrer als auch in Richtung Automation auf der Verhaltens- bzw. Bewertungsebene niederschlagen. Demgemäß kann aus der vorangegangenen Untersuchung angenommen werden, dass sich Einbußen im Modusbewusstsein in Form von Mode Confusion eher bei der Aktivierung von Systemen ergeben (vgl. Kapitel 5.5.1).

In Deaktivierungsphasen ist in dieser Studie zusätzlich zu prüfen, wie sich Übergänge auf ähnliche Systemmodi sowie in zeitkritischen Situationen auswirken. Für beide Merkmale sind dabei weiterführende Erkenntnisse für die vorliegende Arbeit zu erwarten. So könnte sich die funktionale „Ähnlichkeit der Modi“ analog zur Systemaktivierung auch bei der Ausschaltung von Funktionen als zentrales Kriterium für Automation Surprises herauskristallisieren (vgl. Kapitel 5.6). Des Weiteren wird angenommen, dass der „Grad der Kontrollverschiebung“ bei einer vollständigen Deaktivierung von Funktionen stärker ins Gewicht fällt, wenn der Fahrer schnell und unvorhergesehen reagieren muss. Die ursächlichen Inkompatibilitäten zwischen dem erwarteten und realen Systemverhalten sollten sich dann im Fahrerverhalten und in den Fahrerbewertungen niederschlagen. Mit Bezug zur Realfahrtstudie sind in diesem Fall verzögerte oder ausbleibende Reaktionen sowie subjektive Angaben von Intransparenz und fehlendem Verständnis für den aktuellen Systemmodus zu erwarten. Sie deuten auf Einbußen in der Mode Awareness hin und erhöhen in der Folge die Wahrscheinlichkeit für Mode Confusion oder Mode Errors. Auf explorativer Basis wird in der Fahrsimulatorstudie geprüft, ob sich jene falschen Annahmen im mentalen Systemmodell auch in Kenngrößen des Fahrerszustands (biophysiological Parameter) abbilden lassen.

Auf der Grundlage dieser Erläuterungen ergeben sich für die zweite Studie die in den Tabellen 21 und 22 dargestellten Hypothesen. Dabei ist zu beachten, dass auf Basis der Erkenntnisse der ersten Untersuchung das Merkmal „Indirekte Transition“ nur noch in Wechselwirkung zum „Grad der Kontrollverschiebung“ berücksichtigt wird. Analog zur Realfahrt differenzieren die Annahmen zwischen der Richtung der Transition, da Aktivierungsphasen in der zur Verfügung stehenden Handlungszeit nicht 1:1 mit Deaktivierungssituationen vergleichbar sind (vgl. Kapitel 4.3). Jene Unterteilung setzt sich im Ergebnisteil fort (vgl. Kapitel 6.5). Als Datenbasis zur Analyse der Hypothesen dienen in der zweiten Studie Fahrdaten, Videodaten, biophysiological Daten und subjektive Daten (Kapitel 6.4).

Tabelle 21: Hypothesen der zweiten Studie für Transitionen in **Richtung Automation**

Haupteffekt „Grad der Kontrollverschiebung“
Da der Fahrer bei der Aktivierung des Systemmodus „Assistent“ stärker gefordert wird, Teilfunktionen der Automation in Relation zur eigenen Rolle bei der Fahrzeugführung zu unterscheiden, führt dieser „Grad der Kontrollverschiebung“ im Unterschied zu den anderen häufiger zu verzögerten Verhaltens- bzw. Blickreaktionen und drückt sich in subjektiven Angaben zur wahrgenommenen Transparenz des Übergangs aus. Die Beanspruchung des Fahrers schlägt sich zudem in biophysiological Parametern nieder und deutet hierbei auf eine verstärkte Orientierungsreaktion hin.
Wechselwirkungseffekt „Grad der Kontrollverschiebung“ * „Indirekte Transition“
„Indirekte Transitionen“ über die Zwischenstufe „ACC“ auf den Systemmodus „Pilot“ gehen im Vergleich zum Modus „Assistent“ und zum direkten Übergang eher mit Einbußen im Modusbewusstsein einher. Sie zeigen sich in Form von verzögerten Verhaltens- bzw. Blickreaktionen, drücken sich in subjektiven Angaben zur wahrgenommenen Transparenz des Übergangs aus und führen zu stärkeren Orientierungsreaktionen in physiologischen Kenngrößen.

**Haupteffekt „Ähnlichkeit von Systemmodi“**

Die Verfügbarkeit von einander funktional ähnlichen Systemen im Fahrzeug führt mit höherer Wahrscheinlichkeit zum Auftreten von Mode Confusion und Mode Errors. Die Transition vom Modus „Assistent“ in den Modus „Pilot“ geht daher häufiger mit verzögerten Verhaltens- bzw. Blickreaktionen, subjektiven Angaben zur Intransparenz des Übergangs und mit stärkeren Orientierungsreaktionen in physiologischen Kenngrößen einher, im Vergleich zu Übergängen aus „Fahrer selbst“. Zudem treten generell Verwechslungen der Modi bei Transitionen in Richtung Automation auf.

Tabelle 22: Hypothesen der zweiten Studie für Transitionen in **Richtung Fahrer**

**Haupteffekt „Grad der Kontrollverschiebung“**

Je stärker der Grad der vorausgehenden Entbindung des Fahrers aus der Fahraufgabe ist, desto höhere Anforderungen werden an ihn bei der Rückübergabe der Kontrolle gestellt. Dies äußert sich vor allem in unvorhergesehenen und vom Fahrer nicht erwarteten Übernahme-situationen. Die Kontrollverschiebung aus dem Modus „Pilot“ führt daher im Vergleich zu Übergängen aus „Assistent“ und „ACC“ zu verzögerten oder ausbleibenden Reaktionen, drückt sich in subjektiven Angaben zur wahrgenommenen Transparenz des Übergangs aus und spiegelt sich in stärkeren Orientierungsreaktionen auf physiologischer Ebene wider.

**Wechselwirkungseffekt „Grad der Kontrollverschiebung“ \* „Indirekte Transition“**

„Indirekte Transitionen“ auf die Zwischenstufe „ACC“ vom Systemmodus „Pilot“ gehen im Vergleich zum Modus „Assistent“ sowie zum direkten Übergang eher mit Einbußen im Modusbewusstsein einher. Sie zeigen sich in Form von verzögerten Verhaltens- bzw. Blickreaktionen, drücken sich in subjektiven Angaben zur wahrgenommenen Transparenz des Übergangs aus und führen zu stärkeren Orientierungsreaktionen in physiologischen Kenngrößen.

**Haupteffekt „Ähnlichkeit von Systemmodi“**

Die gleichzeitige Verfügbarkeit von funktional einander ähnlichen Systemen im Fahrzeug führt mit höherer Wahrscheinlichkeit zum Auftreten von Mode Confusion und Mode Errors. Die Transition vom Modus „Pilot“ in den Modus „Assistent“ geht daher häufiger mit verzögerten Verhaltens- bzw. Blickreaktionen, subjektiven Angaben zur Intransparenz des Übergangs und mit stärkeren Orientierungsreaktionen in physiologischen Kenngrößen einher, im Vergleich zu Übergängen in „Fahrer selbst“ aus „Pilot“.

Über diese Annahmen hinausgehend wird erwartet, dass anhand der Daten der zweiten Studie eine übergeordnete Aussage zu der maximalen Anzahl an gleichzeitig verfügbaren Systemen im Fahrzeug und der Art der Funktionszusammensetzung getroffen werden kann. Zudem soll ergänzend zur Realfahrtuntersuchung die Frage beantwortet werden, welche objektiven und subjektiven Parameter sich eignen, um Mode Confusion bzw. Mode Errors im Fahrkontext abzubilden. Damit einhergehend gilt es, Unterschiede und Gemeinsamkeiten zum Auftreten von Automation Surprises in der Luftfahrt im Vergleich zum Automobilbereich zu identifizieren. Dabei sind längerfristige Auswirkungen in Form von Gewöhnungseffekten mit zu berücksichtigen. Eine erste Ableitung in dieser Richtung ist durch die Integration einer längeren Nutzungsdauer der hier betrachteten Systemmodi vor der jeweiligen Transition möglich.

Das nächste Kapitel widmet sich der methodischen Umsetzung der vorliegenden Studie als Basis zur Überprüfung der genannten Hypothesen und Fragestellungen.

### 6.3 Methodische Umsetzung

In diesem Abschnitt werden die methodischen Rahmenbedingungen der zweiten Studie erläutert. Beginnend bei der Darstellung der Automationsstufen (Kapitel 6.3.1) und der integrierten Anwendungsfälle für Transitionen (Kapitel 6.3.2), beschreibt das Kapitel 6.3.3 die Testumgebung im Fahrsimulator sowie die technische Umsetzung der automatisierten Fahrfunktionen. Daran anschließend folgt die Erläuterung des eigentlichen Versuchs, inklusive Teststrecke, Versuchsplanung und Stichprobe (vgl. Kapitel 6.3.4 bis 6.3.7).

#### 6.3.1 Automationsstufen

In der zweiten Studie wurde analog zu Kapitel 4.2.1 von einem vierstufigen Automationsansatz ausgegangen. Die darin integrierten Teilstufen von Automation (vgl. Abbildung 21) sind durch die, im Kapitel 4.2.2 zugeordneten Systemmodi „Fahrer selbst“, „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ repräsentiert. Sie stellen aufeinander aufbauende Fahrfunktionen unterschiedlichen Unterstützungsgrads dar. Mit Bezug zur übergeordneten Automationsebene stellt Abbildung 60 diese **vier Systemmodi** nochmals zusammenfassend dar. Deren konkrete Auslegung und Implementierung im Fahrsimulatorversuch wird im Abschnitt 6.3.3 näher erläutert.

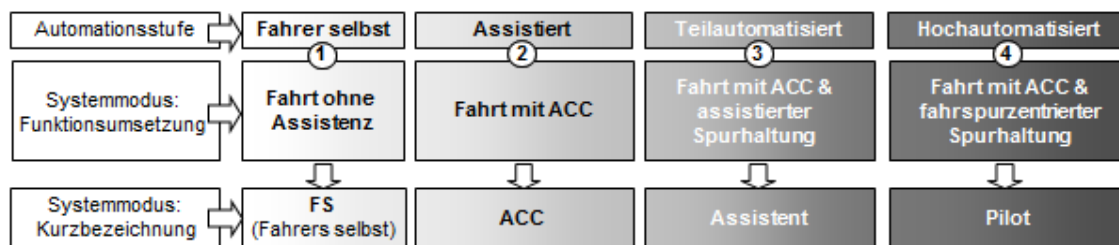


Abbildung 60: Automationsstufen und Systemmodi der zweiten Studie

#### 6.3.2 Integrierte Anwendungsfälle für Transitionen

In der Simulatorstudie wurden insgesamt **12 unterschiedliche Use Cases** für Transitionssituationen zwischen Fahrer und Automation betrachtet. Sie sind in Abbildung 61 in Form eines **Zustandsdiagramms** dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Legende der Abbildung 61 auf die bereits im Kapitel 4.3 erläuterten Übergänge für die ausgewählten Merkmale von Transitionen hinweist. Sie beinhaltet demnach die Zuordnung der Transitionen zu den, in der zweiten Studie betrachteten Merkmalen „Grad der Kontrollverschiebung“ (vgl. Abbildung 28), „Indirekte Transition“ (vgl. Abbildung 29), „Ähnlichkeit von Systemmodi“ (vgl. Abbildung 30) und „Richtung der Transition“ (vgl. Abbildung 31). Diesbezüglich ist anzumerken, dass im Gegensatz zur ersten Studie die „indirekten Transitionen“ auf „Assistent“ bzw. „Pilot“ aus dem Systemmodus „ACC“ selbst stattfanden.



Es wurde demnach die Funktion „ACC“ nicht erst eingeschaltet. Die Gründe dafür lagen vor allem im umgesetzten Versuchsdesign (vgl. Kapitel 6.3.5, 6.3.6).

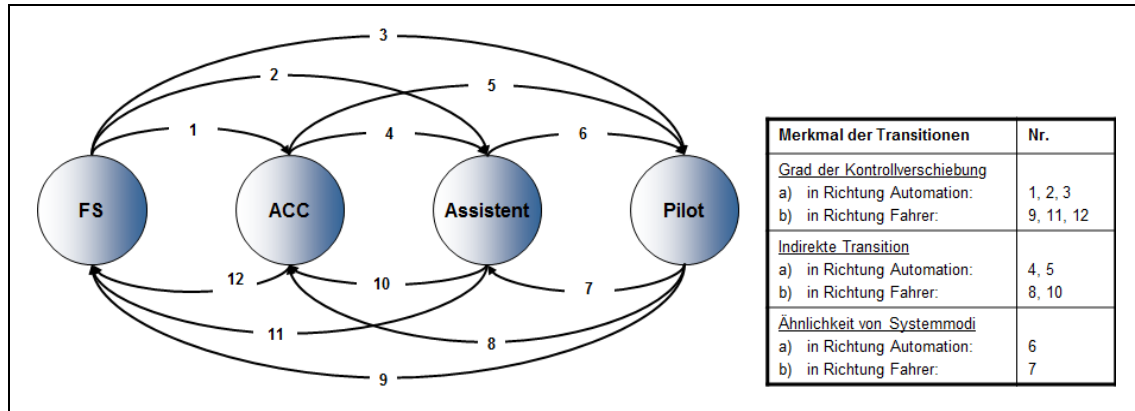


Abbildung 61: Transitionssituationen zwischen den Systemmodi der zweiten Studie

Die konkrete Beschreibung der Transitionssituationen in der Studie findet sich in den Tabellen 23 und 24. Sie lehnt sich an die im Kapitel 4.2.4 erfolgte Ableitung aus technischer und psychologischer Sicht an. Sie repräsentiert folglich die Strukturierungslogik der vorliegenden Arbeit für **Anwendungsfälle** im Fahrkontext (vgl. Abbildung 27). Die tabellarische Darstellung differenziert wiederum nach der „Richtung der Transition“.

Tabelle 23: Beschreibung der Transitionen in **Richtung Automation** aus Abbildung 61

Nr.	Transitionssituationen
1	Der Fahrer aktiviert den fahrzeugseitig verfügbaren Systemmodus „ACC“ erfolgreich. Es findet dabei ein direkter Übergang von „FS“ auf „ACC“ statt. Das System übernimmt die Längsführung des Fahrzeugs.
2	Der Fahrer aktiviert den fahrzeugseitig verfügbaren Systemmodus „Assistent“ erfolgreich. Es findet dabei ein direkter Übergang von „FS“ auf „Assistent“ statt. Das System übernimmt die Längsführung des Fahrzeugs und assistiert bei dessen Querführung.
3	Der Fahrer aktiviert den fahrzeugseitig verfügbaren Systemmodus „Pilot“ erfolgreich. Es findet dabei ein direkter Übergang von „FS“ auf „Pilot“ statt. Das System übernimmt die Längs- und Querführung des Fahrzeugs.
4	Der Fahrer aktiviert aus dem Modus „ACC“ und damit einer Teilfunktion der Automation das fahrzeugseitig verfügbare System „Assistent“ erfolgreich. Jener Übergang entspricht damit einer „indirekten Transition“. Nach Aktivierung des Modus „Assistent“ wird zusätzlich zur Längsführung bei der Fahrzeugquerführung assistiert.
5	Der Fahrer aktiviert aus dem Modus „ACC“ und damit einer Teilfunktion der Automation das fahrzeugseitig verfügbare System „Pilot“ erfolgreich. Jener Übergang entspricht damit einer „indirekten Transition“. Nach Aktivierung des Modus „Pilot“ wird zur Längsführung die Querführung vom Fahrzeug übernommen.
6	Der Fahrer aktiviert aus dem Modus „Assistent“ das fahrzeugseitig verfügbare System „Pilot“ erfolgreich. Jener Übergang entspricht einer Transition auf einen funktional ähnlichen Modus. Nach Aktivierung des Modus „Pilot“ wird zusätzlich zur Längsführung die Querführung vom Fahrzeug übernommen. Hierbei ist zu beachten, dass der „Assistent“ bereits bei der Spurhaltung unterstützte.

Tabelle 24: Beschreibung der Transitionen in **Richtung Fahrer** aus Abbildung 61

Nr.	Transitionssituationen
7	Der Systemmodus „Pilot“ wird infolge der Erreichung von Systemgrenzen fahrzeugseitig deaktiviert. Es findet dabei ein Übergang von „Pilot“ auf den noch verfügbaren und funktional ähnlichen Modus „Assistent“ statt. Das Fahrzeug unterstützt folglich nur noch in der Querführung. Die Längsführung wird weiterhin vom System übernommen.
8	Der Systemmodus „Pilot“ wird infolge der Erreichung von Systemgrenzen fahrzeugseitig deaktiviert. Es findet dabei ein „indirekter Übergang“ von „Pilot“ auf den noch verfügbaren Modus „ACC“ (Teilstufe der Automation) statt. Das Fahrzeug gibt damit die Querführung vollständig an den Fahrer zurück und behält die Kontrolle über die Längsführung bei.
9	Der Systemmodus „Pilot“ wird infolge der Erreichung von Systemgrenzen fahrzeugseitig deaktiviert. Es findet dabei ein direkter Übergang von „Pilot“ auf „FS“ statt. Das System gibt die Längs- und Querführung des Fahrzeugs vollständig an den Fahrer zurück.
10	Der Systemmodus „Assistent“ wird infolge der Erreichung von Systemgrenzen fahrzeugseitig deaktiviert. Es findet dabei ein „indirekter Übergang“ von „Assistent“ auf den noch verfügbaren Modus „ACC“ (Teilstufe der Automation) statt. Das Fahrzeug gibt damit die Querführung vollständig an den Fahrer zurück und behält die Kontrolle über die Längsführung bei.
11	Der Systemmodus „Assistent“ wird infolge der Erreichung von Systemgrenzen fahrzeugseitig deaktiviert. Es findet dabei ein direkter Übergang von „Assistent“ auf „FS“ statt. Das System gibt die Längs- und Querführung des Fahrzeugs vollständig an den Fahrer zurück.
12	Der Systemmodus „ACC“ wird infolge der Erreichung von Systemgrenzen fahrzeugseitig deaktiviert. Es findet dabei ein direkter Übergang von „ACC“ auf „FS“ statt. Das System gibt die Längsführung des Fahrzeugs vollständig an den Fahrer zurück.

Gemäß den Tabellen 23 und 24 lag der Schwerpunkt zum einen auf Transitionen, die über eine fahrerseitige Aktivierung von Systemen im **Normalbetrieb** eine Zunahme an Automation bewirken (vgl. Nr. 1 bis 6 in Tabelle 23). Zum anderen wurden Übergänge an **Systemgrenzen** betrachtet, die infolge der Deaktivierung von Fahrfunktionen Transitionen in Richtung Fahrer auslösen (vgl. Nr. 7 bis 12 in Tabelle 24). In beiden Fällen variierte der Automatisierungsgrad der ein- bzw. ausgeschalteten Funktion und somit das Ausmaß der Kontrollverschiebung zwischen Fahrer und Automation. In der zweiten Untersuchung betraf dies die De- und Aktivierung der Modi „ACC“, „Assistent“ bzw. „Pilot“ (vgl. Abbildung 61). Der Abwurf der Funktionen auf „FS“ erfolgte dabei in einer **ungewöhnlichen und zeitkritischen Situation** (vgl. Kapitel 6.3.4). Der Übergang beinhaltete somit ein weiteres Merkmal von Transitionen, die mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für Automation Surprises einhergehen (vgl. Tabelle 7 und Abbildung 26). Zudem differierte in der Studie die „Art der erfolgten Transition“. Demgemäß wurden analog zur ersten Untersuchung indirekte Übergänge aus bzw. in den Modus „ACC“ integriert (vgl. Nr. 4, 5 und 8, 10 in Abbildung 61). Des Weiteren erfolgten Transitionen auf einander sehr ähnliche Fahrfunktionen (vgl. Nr. 6 und 7, Abbildung 61).

Welches konkrete Ereignis die betrachteten Übergabe- und Übernahmeszenarien auslöste, wird im Kapitel 6.3.4 ausführlich dargestellt.

Auf der Basis der Erkenntnisse der ersten Studie zum Einfluss von indirekten Transitionen und ähnlichen Systemmodi im Fahrzeug, fand in der vorliegenden Untersuchung zusätzlich die **Integration von erweiterten Übergängen** statt (vgl. Kapitel 6.3.4, Abbildung 68). So wurde zum einen geprüft, wie sich eine vollständige Kontrollrückgabe aus dem Modus „Assistent“ bzw. „Pilot“ mit einer anschließenden Möglichkeit, den Modus „ACC“ zu aktivieren, auswirkt. Die Frage war hierbei, ob sich durch diese Gestaltung des Übergangs Unterschiede zur „indirekten Transition“ auf „ACC“ ergeben. Zum anderen erlebten ausgewählte Probanden Transitionen, die nach einer vollständigen Deaktivierung des Modus „Pilot“ die Option der Einschaltung des Systems „Assistent“ anboten. Auch dabei interessierte, ob Effekte wie Mode Confusion durch die bewusste Aktivierung der funktional ähnlichen Fahrfunktion vermieden werden können. Da diese Übergänge nicht alle Probanden betrafen und zudem nicht Kernbestandteil der zweiten Studie sind, findet deren Beschreibung erst im Kapitel 6.3.5 statt.

Im Folgenden wird dargestellt, wie die erläuterten Transitionen und Systemmodi des Automationsansatzes im Versuch durch die Nutzung eines Fahrsimulators umgesetzt wurden.

### 6.3.3 Fahrsimulator

Die Untersuchung fand im statischen Fahrsimulator der Volkswagen AG statt. Hierbei handelt es sich um ein **modular aufgebautes Mock-up**. Dieses ist überwiegend aus U-Profilen zusammengesetzt und ermöglicht somit eine flexible Anordnung von Bedienelementen sowie Anzeigen (vgl. Abbildung 62).



Abbildung 62: Versuchsaufbau im Fahrsimulator der Volkswagen AG

Die Unterteilung in den Simulatorraum mit Leinwand, Beamer und Fahrstand (Abbildung 62, links & Mitte) sowie den Steuerraum mit Steuerpult und PC-Arbeitsplatz (Abbildung 62, rechts) ermöglicht einen ungestörten Versuchsablauf mit systematischen Eingriffsmöglichkeiten für den Versuchsleiter. Der Simulatorraum ist zudem mit dimmbaren Lampen abdunkelbar und gewährleistet durch ständige Klimatisierung eine relativ konstante Raumtemperatur von 18 Grad Celsius.

Zu den wesentlichen **Komponenten des Fahrsimulators** gehören der Fahrersitz mit Sicherheitsgurt, zwei Außenspiegel, eine Mittelkonsole, eine Handbremse sowie ein Kombiinstrument (LCD-Display) mit Drehzahl- und Geschwindigkeitsmesser. Der Fahrstand hat eine Automatikschaltung, die mit Gas- und Bremspedal gekoppelt ist. Außerdem besitzt das Mock-up als aktives Bedienelement ein Lenkrad mit elektromotorisch erzeugbaren Rückstellmoment. Die Hardware des Fahrsimulators umfasst weiterhin drei Rechner, bestehend aus einem Master und zwei nachgeschalteten Einheiten zur Visualisierung der Fahrtszenerie. Die Mastereinheit erfasst den Input aus der Fahrzeugbedienung in Form von Lenkradwinkel, Gas- und Bremspedalstellung mit einer Abtastrate von 100 Hz. Die über die Lenkung und Fahrpedalerie eingehenden Signale werden dann auf Basis des verwendeten Fahrdynamikmodells (Golf V, Automatikgetriebe) in Bewegungsgrößen des Fahrzeuges umgerechnet. In Abhängigkeit dieser Kennwerte erfolgen letztlich die Anpassungen der Lenkkräftsimulation, der Fahrposition in der virtuellen Welt sowie der Anzeigen des Kombiinstrumentes. Zusätzlich gehen über ein Soundmodell Motordrehzahl, Last- und Reifenbewegung in akustische Ausgaben von Motor-, Wind- sowie Rollgeräuschen ein. Diese werden dem Fahrer über frontal positionierte Stereo-Lautsprecher dargeboten. Auf drei Leinwänden zur Frontansicht wird zudem die virtuelle Welt über eine dreidimensional texturierte Grafikausgabe dargestellt (vgl. Abbildung 62, links). Diese basiert auf dem Verkehrssimulationstool der Krauss-Maffei Wegmann (KMW) GmbH & Co. KG (vgl. Abschnitt 6.3.4). Drei Videobeamer projizieren hierfür die Nachbildungen von Straße und Umwelt auf die ca. 3,6 m vom Mock-up entfernten Leinwände (Bildgröße 3 m x 3 m). Infolge deren Positionierung erhält der Fahrer eine nahezu 180 Grad Sicht der Simulation.

### Untersuchungsrelevante Erweiterungen im Simulator- und Steuerraum

Für die geplante Untersuchung fand im Simulatorraum die Anbringung eines 6,5 Zoll großen Statusdisplays statt (Abbildung 63, links). Im Steuerraum wurde zusätzlich ein Kontroll-Bildschirm und ein Messlaptop aufgestellt (Abbildung 63, rechts).

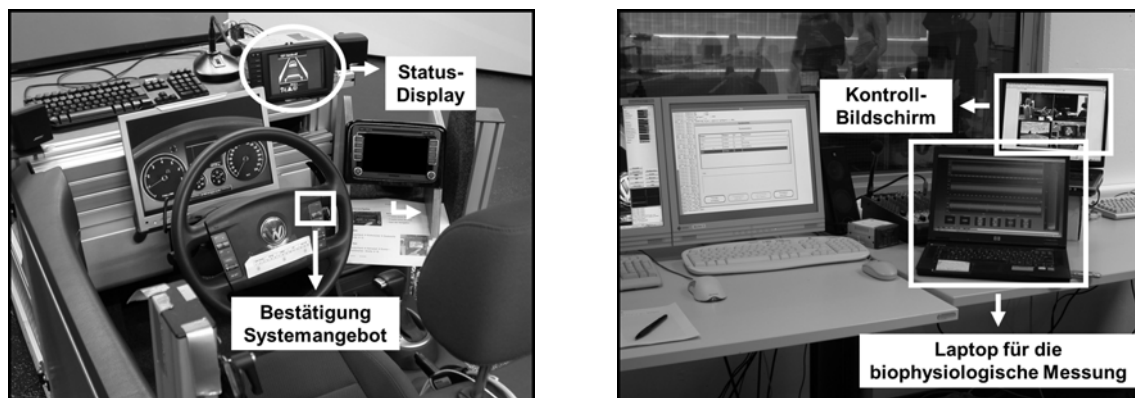


Abbildung 63: Erweiterungen im Simulatorraum (links) und im Steuerraum (rechts)

Das rechts oberhalb vom Kombiinstrument angebrachte Status-Display (vgl. Abbildung 63, links) wurde zur Visualisierung der **Systemzustände** sowie deren Veränderungen genutzt. In Analogie zur ersten Studie wurde hierbei ein Wechsel der Anzeigen von einem akustischen Signal begleitet (vgl. Kapitel 5.3.3). Ein relativ sanfter Ton charakterisierte wiederum Systemangebote oder Übernahmeaufforderungen, die mit keinem vollständigen Systemabwurf einhergingen. Alle Transitionen auf „Fahrer selbst“ waren hingegen mit einem hohen, relativ lauten Signal samt roter Displaydarstellung verbunden (vgl. Abbildung 64). Die Modi „Assistent“ und „Pilot“ unterscheiden sich erneut nur in der Visualisierung der Querverführungsunterstützung.

Die Systemangebote konnten fahrerseitig über eine rot gekennzeichnete Lenkradtaste aktiviert werden (Abbildung 63, links). Deren Bestätigung ging als Triggersignal in die generierten Datenfiles ein. Zudem war das Status-Display mit dem Fahrzeug-CAN des Simulators gekoppelt, um eine Kommunikation über CAN-Botschaften zu ermöglichen. Hiermit war zum einen gewährleistet, dass mit dem jeweilig angeforderten Systemstatus eine synchrone Anpassung der Fahrzeugregelung erfolgte. Zum anderen bestand gleichfalls die Möglichkeit, Veränderungen im Systemzustand als Marker in den geloggten Datenfiles zu kennzeichnen.

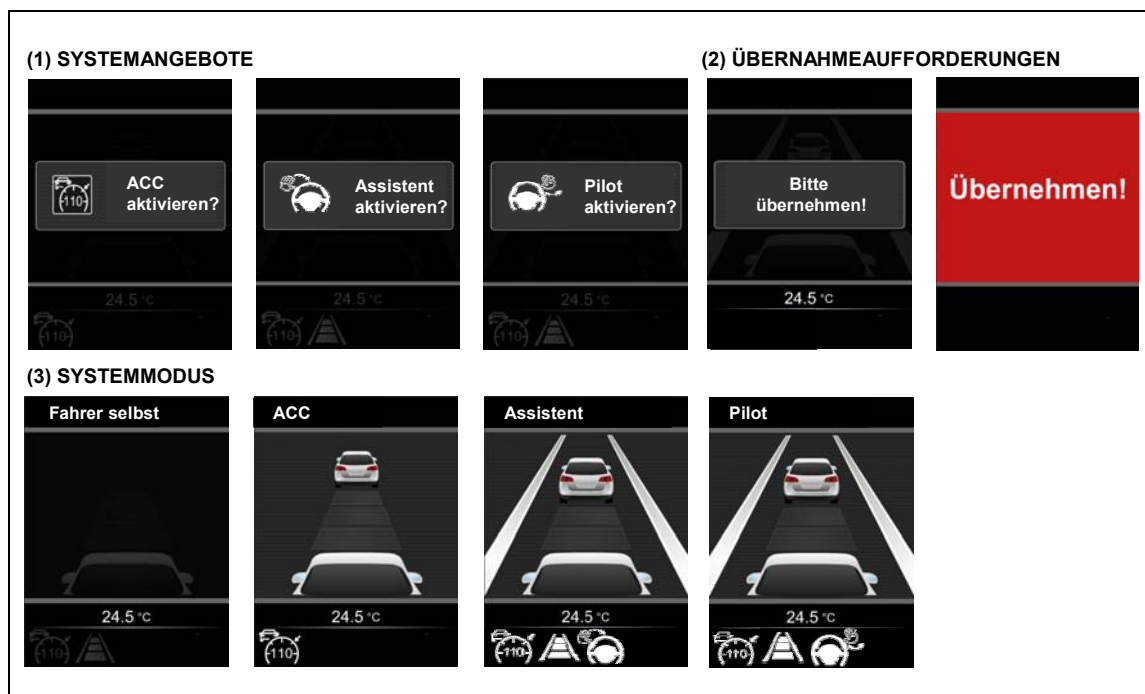


Abbildung 64: Systemzustandsanzeigen der zweiten Studie

Neben den Erweiterungen am Fahrsimulator, diente im Steuerraum ein Laptop als **Kontroll-Bildschirm** (Abbildung 63, rechts). Der Versuchsleiter hatte so die Möglichkeit, den Probanden und dessen Verhalten zu beobachten. Hierfür standen ihm die **Videostreams**

von vier Kameras zur Verfügung, die mittels Quad Split in einem Bild vereint visualisiert wurden (vgl. Abbildung 63, rechts). Die Viererdarstellung zeigte zum einen den Fahrer aus zwei Perspektiven und enthielt zum anderen das Simulatorbild sowie die Systemzustandsanzeigen des Status-Displays. Des Weiteren befand sich im Steuerraum ein **Messlaptop**, der zur Aufzeichnung von **biophysiologicalen Daten** genutzt wurde (vgl. Abbildung 63, rechts). Mit Hilfe der erstellten, grafischen Benutzeroberfläche konnte der Versuchsleiter auf einen Blick alle relevanten Kenngrößen erfassen (vgl. Kapitel 6.4.3), gegebenenfalls Korrekturen vornehmen und Marker setzen (vgl. Kapitel 6.3.6).

### Technische Umsetzung der Systemmodi im Fahrsimulator

Im Fahrsimulator der Volkswagen AG erfolgt die Modellierung des dynamischen Ego-Fahrzeugverhaltens auf Basis eines **nichtlinearen Zweispurmodells** (Heißing & Ersoy, 2007) unter Nachbildung von fahrzustandsabhängigen Radstellungsänderungen und dynamischen Reifeneigenschaften. Mittels dieser Vorgehensweise resultiert aus den Fahrereingaben (Lenken, Bremsen, Gasgeben) eine realitätsnahe Reaktion des Ego-Fahrzeugs in der virtuellen Welt. Auch die in der vorliegenden Studie untersuchten Systemmodi „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ nutzten die Zusammenhänge jenes Zweispurmodells. Um die technische Nachbildung der drei automatisierten Fahrfunktionen plastischer zu machen, werden im Folgenden die jeweilig verwendeten Reglerstrukturen dargestellt. Die Erläuterungen beziehen sich hierbei zunächst auf das „ACC“ und anschließend auf die Algorithmen für die Spurhaltungsvarianten der Modi „Assistent“ sowie „Pilot“.

Für die Simulation der Funktion „**ACC**“ bedarf es zum einen der Definition von Reglern für die Geschwindigkeit, den Abstand und die Beschleunigung. Diese sind mit spezifischen Sollgrößen zu belegen. Zum anderen benötigt die ACC-Regelung Daten aus der Umwelt und über den Fahrzeugzustand, die auf Basis von Sensorinformationen gewonnen werden. Dementsprechend wurde in der vorliegenden Studie zunächst festgestellt, welche Fahrzeuge der Verkehrssimulation im Erfassungsbereich eines nachgebildeten Sensors liegen. Dieser bestand aus einem Kegel, der den Fernbereichssensor modelliert und aus einem Rechteck mit aufgesetztem Halbkreis zur Simulation des Nahbereichssensors (vgl. Abbildung 65). Die Reichweite  $d_1$  des Fernbereichssensor betrug bei einem Winkel  $\alpha$  von acht Grad ca. 150 m. Im Nahbereich  $d_2$  erfasste der Radar hingegen Objekte in 40 m Entfernung (vgl. Abbildung 65). Eine Regelung auf einsicherende Fahrzeuge konnte somit nur bedingt erfolgen. Hierbei spielte gleichfalls die maximal mögliche Verzögerung von  $-3 \text{ m/s}^2$  durch das ACC-System eine Rolle. Die Erreichung dieser Grenze ging mit einem sofortigen Abwurf der Längsführung und demnach mit einer Übernahmeaufforderung an den Fahrer einher.

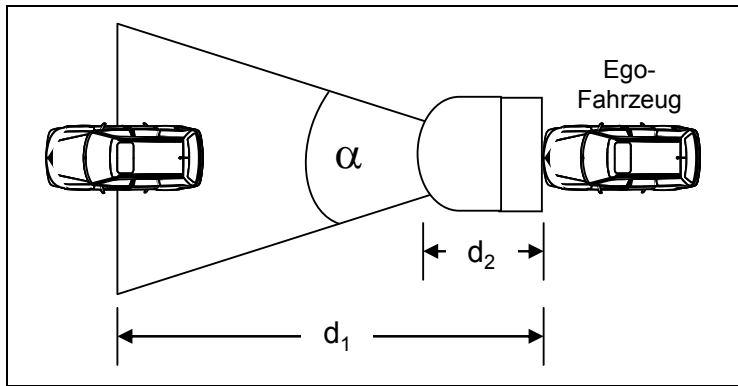


Abbildung 65: Erfassungsbereich des umgesetzten ACC Sensors in der Fahrsimulation

Unter Normalbetrieb berechnete der implementierte Abstands- und Geschwindigkeitsregler aus den versuchsbedingten Vorgaben vom Sollabstand (1.5 s), der Sollgeschwindigkeit (110 km/h), der Änderungsgeschwindigkeit des Abstands und der Verzögerungsstärke des Vorderfahrzeugs eine Längsbeschleunigung. Deren fahrdynamische Umsetzung erfolgte durch den nachgeschalteten Beschleunigungsregler in Form von Gas- und Bremseneingaben. Beschleunigungswünsche des Fahrers im ACC-Betrieb, die über die korrespondierende Größe des ACC-Reglers hinausgingen, wurden in dieser Studie berücksichtigt und zugelassen. Im Gegensatz dazu fand für den vorliegenden Versuch eine Vereinfachung der Funktionslogik der ACC-Bedienung statt. Damit die relativ hohe Komplexität der ACC Bedienelemente (Mühlbacher, 2003) keinen zusätzlichen Effekt in der Untersuchung hat, konnten die Probanden das System nur aktivieren sowie mittels Gas- und Bremspedal übersteuern. Die serienmäßig vorhandenen Systemzustände „OFF“, „CANCEL“, „RES“, „SET“ sowie die Verstellung der Geschwindigkeit und des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug wurden folglich nicht implementiert.

Die Algorithmen der **Spurhaltungsvarianten** für die Modi „Assistent“ und „Pilot“ basierten auf dem Aim Point Error Modell (Naab & Reichart 1994; Kaussner, Buld & Krüger, 2000). Der Aim Point Error misst hierbei vereinfacht die Abweichung des Ego-Fahrzeugs von der Spurmitte in einem Vorausschauzeitpunkt, der in der Zukunft liegt. Die zu diesem Zeitpunkt bestehende Querposition ist dann wiederum ausschlaggebend für die Stärke korrigierender Lenkeingriffe. Jene sind ferner von der momentanen Fahrgeschwindigkeit abhängig, welche in der vorliegenden Studie max. 110 km/h betrug. In Analogie zur Realfahrtuntersuchung (vgl. Abbildung 40) wurde für die fahrspurzentrierte Querführung im Modus „Pilot“ ein Permanentsystem sowie für die assistierte Spurhaltung im Modus „Assistent“ ein Korridorsystem umgesetzt (Abbildung 66).

Das **Permanentsystem** (Abbildung 66, links) reagierte infolge des definierten Toleranzbereichs für Veränderungen in der Querposition sofort auf Abweichungen vom Sollkurs mit einer Gegenlenkkraft (Penka, 2000). Für den Modus „Pilot“ konnte somit eine fahrspurzentrierte Auslegung der Spurhaltung umgesetzt werden. Jene ermöglichte prinzipiell die Wegnahme der Hände vom Lenkrad.

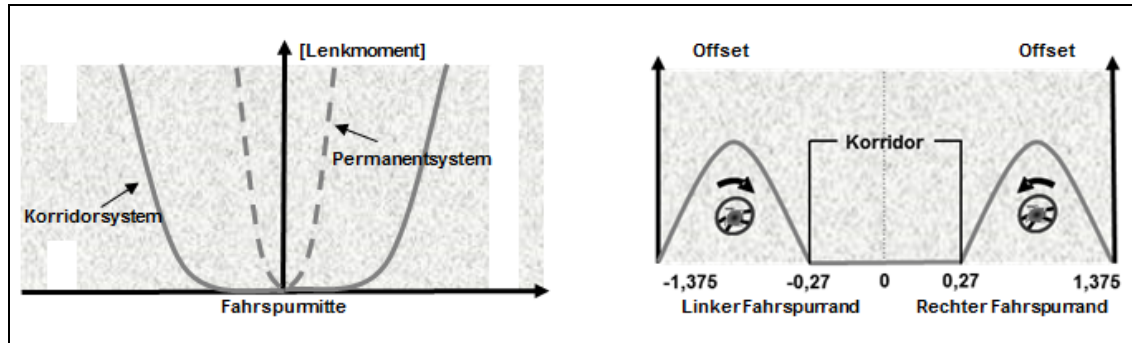


Abbildung 66: Schematische Darstellung des „Korridorsystems“ und des „Permanentsystems“ (links) mit Verlauf des Lenkmoments für das Korridorsystem (rechts)

Die Führung beim „Assistenten“ erfolgte hingegen nur unterstützend auf der Basis eines **Korridorsystems** (vgl. Abbildung 66, links). Dieses gab dem Fahrer einen gewissen Freiraum (Korridor), in dem er sich selbstständig bewegen und seine laterale Position wählen konnte. Der Toleranzbereich, in dem die Probanden im Modus „Assistent“ keine Korrekturen erlebten, betrug ausgehend von der Spurmitte 0,27 m nach rechts bzw. links (vgl. Abbildung 66, rechts). Nahe den Fahrbahnrandern wurde der Systemeingriff allerdings deutlich spürbar. Er war in der Simulatorstudie durch ein von der Fahrstreifenmitte zunehmendes Gegenlenkmoment charakterisiert. Jenes betrug maximal 2,2 Nm und minimal 0,4 Nm. Laut Buschardt (2003) sollte diese gerichtete Handlungsempfehlung vom Fahrer eindeutig wahrnehmbar sein. In jenem Zusammenhang ist anzumerken, dass das Zusatzlenkmoment sowohl im Modus „Pilot“ als auch im Modus „Assistent“ beim Setzen des Blinkers automatisch passiviert und auf dem neuen Fahrstreifen wieder aktiviert wurde. Führt der Proband einen Fahrstreifenwechsel ohne Initiierung des Richtungsanzeigers durch, musste das Gegenlenkmoment von ihm übersteuert werden.

### 6.3.4 Versuchsstrecke

In Analogie zum Anwendungskontext der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 4.2.3), wurde für den Simulatorversuch eine **Fahrtstrecke auf einer Autobahn** ausgewählt. In der verwendeten Verkehrssimulation der Krauss-Maffei Wegmann GmbH & Co. KG stand hierfür ein ca. 28 km langer Abschnitt zur Verfügung. Dieser wies vorwiegend zweispurige Fahrbahnen auf, die durch leichte Kurven und eine relativ gering variierende Landschaft charakterisiert waren. Infrastrukturell ergaben sich keine Behinderungen in Form angelegter Baustellen oder sonstigen Verengungen. Die Richtgeschwindigkeit betrug zumeist 130 km/h, verringerte



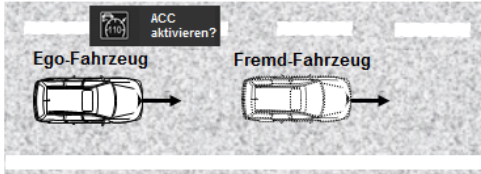
sich in einigen Fällen jedoch bis auf 100 km/h. Für ein vollständiges Durchfahren des Streckenabschnitts wurde eine Fahrzeit von 15 bis 20 min benötigt.

Auf dem ausgewählten Autobahnstück befanden sich in der Simulatoruntersuchung zudem Fahrzeuge, die sich auf der Gegenfahrspur automatisch und auf der Egofahrspur über **Auslösepunkte** getriggert in Fahrtrichtung bewegten. Die Simulation dieses Fremdverkehrs erfolgte skriptgesteuert auf einer XML (Extensible Markup Language) basierten Datenstruktur von KMW. Über die einzelnen XML-Elemente des hierarchisch geordneten Gerüsts konnten Autos in Abhängigkeit der Position des Ego-Fahrzeuges an konkreten X- und Y-Koordinaten eingesetzt werden. Darüber hinaus bestand die Möglichkeit, diese mit einer spezifischen Geschwindigkeit zu parametrieren bzw. deren Trajektorie festzulegen. Auf diese Weise waren zum Beispiel unerwartete Auffahrsituationen auslösbar. Darüber hinaus konnte eine Abwechslung der Fahrtszenerie über die Generierung von Autobahnabfahrten bzw. -auffahrten und über neu einsetzendem Verkehr gewährleistet werden.

Neben den Fremdfahrzeugen erfolgte in der zweiten Studie gleichfalls die Integration von Tieren (z.B. Rehe) in die Simulation. Jene wurden nach dem eben erläuterten Prinzip mit einem spezifischen Verhalten definiert. Um die beschriebenen Ereignisse gezielt zu triggern, musste der Autobahnabschnitt in Fahrtrichtung des Egofahrzeugs für den selbstregelnden Fremdverkehr gesperrt werden. Erst dann konnte über die XML-basierte Datenstruktur ein Einsatz von versuchsrelevanten Objekten an definierten X-Y-Koordinaten der Simulationswelt stattfinden. Die damit erzeugten Fahrsituationen (z.B. Auftauchen eines Fremdfahrzeuges) standen wiederum symbolisch für die zu implementierenden Transitionssituationen (vgl. Kapitel 6.3.2). Diese waren infolge der systematisch erzeugten Verkehrssimulation in ihrem Ablauf stets miteinander vergleichbar.

Die einzelnen **Fahrszenarien** sind in Abbildung 67 und 69 schematisch dargestellt und beschrieben. Hierbei ist zu beachten, dass sie zum einen nach der Richtung des erfolgten Übergangs unterteilt sind. Zum anderen ist in den Abbildungen bereits vermerkt, für welche laut Untersuchungsdesign definierte Versuchsgruppe (VG) der Anwendungsfall Gültigkeit hatte. Diesbezüglich sei vorweggenommen, dass die Probanden der Simulatorstudie auf die vier betrachteten Systemmodi „FS“, „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ aufgeteilt wurden (vgl. Kapitel 6.3.5). Die jeweilige Versuchsgruppe war dann wiederum ausschlaggebend für den nach der Transition folgenden Systemmodus (vgl. Kapitel 6.3.6). Auf jene Weise konnten alle Übergabe- und Übernahmesituationen systematisch in einem relativ einfachen Versuchsaufbau integriert werden. Zudem ist zu erwähnen, dass in Abbildung 68 ein Szenario dargestellt ist, welches die in Kapitel 6.3.2 angesprochene Option ermöglichen sollte, nach einem Übergang auf „FS“ den Modus „ACC“ oder „Assistent“ zu aktivieren. Hintergrund dieser Gestaltung des Übergangs war die Frage, ob damit Einbußen im Modusbewusstsein verhin-

dert werden können. Die Situation musste sich hierfür von der Kollisionssituation mit dem Reh unterscheiden (vgl. Abbildung 69), um damit verbundene Einflüsse auszuschließen.

<b>Systemangebot: Übergang auf „ACC“</b>	<b>Transitionsszenario (Nr. 1 in Abbildung 61)</b>										
	<ul style="list-style-type: none"><li>Ego-Fahrzeug fährt in der Ego-Fahrspur (<math>v_{Ego} &lt; 110</math> km/h)</li><li>Ein Fremd-Fahrzeug konnte sich vor dem Ego-Fahrzeug befinden, insofern der Proband vorher nicht schneller als 110 km/h gefahren ist</li><li>Das Systemangebot „ACC aktivieren?“ wurde bei Erreichung eines definierten Streckenpunkts ausgelöst. Bei Vorliegen eines Fremd-fahrzeugs erfolgte dies in ca. 75 m Abstand zum vorausfahrenden Auto</li><li>Nach fahrerseitiger Bestätigung aktivierte sich das ACC (<math>v_{max} = 110</math> km/h, <math>d_{Soll} = 1.5</math> s und <math>a_{max} = -3m/s^2</math>)</li></ul>										
<table border="1"><tr><td>Gültig für VG:</td><td>FS</td><td>ACC</td><td>Assistent</td><td>Pilot</td></tr><tr><td></td><td>x</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr></table>	Gültig für VG:	FS	ACC	Assistent	Pilot		x	-	-	-	
Gültig für VG:	FS	ACC	Assistent	Pilot							
	x	-	-	-							

**Systemangebot: Übergang auf „Assistent“**	**Transitionsszenario (Nr. 2, 4 in Abbildung 61)**																								
	- Ego-Fahrzeug fährt mittig in der geraden Ego-Fahrspur ( $v_{Ego} < 110$  km/h) - Beide Fahrstreifenmarkierungen sind gut sichtbar - Ein Fremd-Fahrzeug konnte sich vor dem Ego-Fahrzeug befinden, insofern der Proband vorher nicht schneller als 110 km/h gefahren ist - Das Systemangebot „Assistent aktivieren?“ wurde bei Erreichung eines definierten Streckenpunkts ausgelöst. Bei Vorliegen eines Fremd-fahrzeugs erfolgte dies in ca. 75 m Abstand zum vorausfahrenden Auto - Nach fahrerseitiger Bestätigung aktivierte sich der „Assistent“ ( $v_{max} = 110$  km/h,  $d_{Soll} = 1.5$  sec und  $a_{max} = -3m/s^2$ , Korridorsystem mit Gegenlenkmoment bei  $\pm 0.27$  m Abweichung von Spurmitte)																								
							----------------	----	-----	-----------	-------		Gültig für VG:	FS	ACC	Assistent	Pilot			x	x	-	-		
**Systemangebot: Übergang auf „Pilot“**	**Transitionsszenario (Nr. 3, 5, 6 in Abbildung 61)**																								
	- Ego-Fahrzeug fährt mittig in der geraden Ego-Fahrspur ( $v_{Ego} < 110$  km/h) - Beide Fahrstreifenmarkierungen sind gut sichtbar - Ein Fremd-Fahrzeug konnte sich vor dem Ego-Fahrzeug befinden, insofern der Proband vorher nicht schneller als 110 km/h gefahren ist - Das Systemangebot „Pilot aktivieren?“ wurde bei Erreichung eines definierten Streckenpunkts ausgelöst. Bei Vorliegen eines Fremd-fahrzeugs erfolgte dies in ca. 75 m Abstand zum vorausfahrenden Auto - Nach fahrerseitiger Bestätigung aktivierte sich der „Pilot“ ( $v_{max} = 110$  km/h,  $d_{Soll} = 1.5$  sec und  $a_{max} = -3m/s^2$ , Permanentsystem mit fahrspurzentrierter Spurführung)																								
							----------------	----	-----	-----------	-------		Gültig für VG:	FS	ACC	Assistent	Pilot			x	x	x	-		

Abbildung 67: Fahrscenarien für Transitionen in Richtung Automation

## Systemgrenze: Übergang auf „Fahrer selbst“

The diagram shows an ego vehicle (Ego-Fahrzeug) moving at  $v_{Ego} = 110 \text{ km/h}$  in the ego lane. A foreign vehicle (Fremd-Fahrzeug) is shown changing lanes from the adjacent lane into the ego lane without signaling. A red box with a lightning bolt and the word "Übernehmen!" (Take over!) indicates the transition point where the driver must take control.

Gültig für  
VG:

FS

ACC

Assistent

Pilot

-

-

x

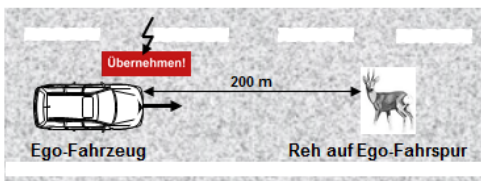
x


## Sondertransitionsszenario\*

- Ego-Fahrzeug fährt in Ego-Fahrspur ( $v_{Ego} < 110 \text{ km/h}$ )
- Ein Fremdfahrzeug auf der Nachbarfahrspur wechselt ohne Initiierung des Blinkers plötzlich auf die Ego-Fahrspur
- Da die maximale Verzögerung von ACC mit  $a_{max} = -3 \text{ m/s}^2$  nicht ausreicht, um das Egofahrzeug einzubremsen, wird eine Übernahmeaufforderung auf „Fahrer selbst“ ausgelöst (Abwurf der Längs- und Querverführung des Fahrzeugs)

\* Dieses Sondertransitionsszenario wird für die Umsetzung der Option genutzt, nach einer vollständigen Kontrollrückgabe auf „FS“ entweder den Modus „ACC“ oder den Modus „Assistent“ aktivieren zu können (vgl. Kapitel 6.3.2). Hintergrund dessen ist die Frage, ob durch diese Gestaltung des Übergangs Einbußen im Modusbewusstsein oder gar Mode Confusion verhindert werden können.

Abbildung 68: Sonderfahrscenario für Transitionen in Richtung Fahrer

Systemgrenze: Übergang auf „Fahrer selbst“					Transitionsszenario (Nr. 9, 11, 12 in Abbildung 61)
					<ul style="list-style-type: none"><li>Ego-Fahrzeug auf der Ego-Fahrspur (<math>v_{Ego} &lt; 110</math> km/h) kommt aus einer Kurve und fährt auf ein schwer präzifizierbares Reh auf der Ego-fahrspurmitte zu</li><li>ca. 200 m vor dem Reh wird eine Übernahmeaufforderung auf „Fahrer selbst“ ausgelöst (Abwurf der Längs- und Querverführung des Fahrzeugs)</li></ul>
Gültig für VG:	FS	ACC	Assistent	Pilot	* Die Versuchsgruppe „FS“ erfährt die gleiche Situation, aber: Der Fahrer erhält kein Hinweissignal, er reagiert selbstbestimmt bei Erkennung der Kollisionsgefahr mit dem Reh
	-	x	x	x	

Systemgrenze: Übergang auf „ACC“					Transitionsszenario (Nr. 8, 10 in Abbildung 61)
					<ul style="list-style-type: none"><li>Ego-Fahrzeug fährt in der Ego-Fahrspur (<math>v_{Ego} &lt; 110</math> km/h) und durchquert eine Kurve mit <math>r</math> größer als <math>r_{max}</math> von „Assistent“ und „Pilot“</li><li>Bei Erreichung des Kurvenscheitelpunkts erfolgt eine moderate Übernahmeaufforderung</li><li>„Assistent“ bzw. „Pilot“ werden ausgeschaltet, da die Spurhaltung nicht mehr gewährleistet ist</li><li>„ACC“ bleibt aktiviert (<math>v_{max} = 110</math> km/h, <math>d_{soll} = 1.5</math> sec und <math>a_{max} = -3</math> m/s<sup>2</sup>) und regelt nach der Transition auf ein nach dem Kurvenausgang eingesetztes Fremdfahrzeug</li></ul>
Gültig für VG:	FS	ACC	Assistent	Pilot	
	-	-	x	x	

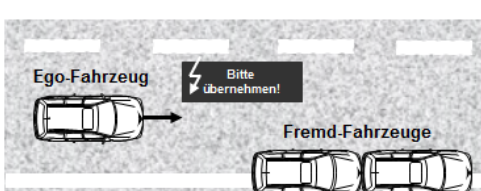
Systemgrenze: Übergang auf „Assistent“					Transitionsszenario (Nr. 7 in Abbildung 61)
					<ul style="list-style-type: none"><li>Ego-Fahrzeug fährt auf der Ego-Fahrspur (<math>v_{Ego} &lt; 110</math> km/h), deren rechte Fahrbahnmarkierung von zwei Fremdfahrzeugen verdeckt wird</li><li>Die nur einseitig absicherbare Spurhaltung führt mit einer moderaten Übernahmeaufforderung zu einem Übergang auf „Assistent“ (Korridorsystem mit Gegenlenkmoment bei <math>\pm 0.27</math> m Abweichung von Spurmitte)</li><li>Der Fahrer muss die Lenkung wieder übernehmen, da bei der Querverführung des Fahrzeugs systemseitig nur assistiert wird</li></ul>
Gültig für VG:	FS	ACC	Assistent	Pilot	
	-	-	-	x	

Abbildung 69: Fahrscenarien für Transitionen in Richtung Automation

In Ergänzung zu den in Abbildung 67 bis 69 dargestellten Szenarien wurden für den vorliegenden Versuch weitere, transitionsunabhängige Use Cases in die Verkehrssimulationsskripte eingefügt. Jene forcierten die Interaktion mit dem jeweiligen Systemmodus oder machten die Funktionalität der Fahrfunktion für den Probanden stärker erlebbar:

- **Folgefahrt** mit variierender Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fremdfahrzeuges
- **Freie Fahrt** ohne Fremdfahrzeug im Erfassungsbereich des ACC
- **Einsetzende Führungsfahrzeuge** im Verlauf der Fahrt
- **Langsam fahrende Fremdfahrzeuge** zur Forcierung von Fahrstreifenwechseln des Ego-Fahrzeugs

Die Einsatzpunkte (x-y-Koordinaten) dieser zusätzlichen Fahrsituationen variierten im Verlauf der insgesamt vier absolvierten Fahrten je Versuchsperson (vgl. Kapitel 6.3.5). Dies bewirkte eine Abwechslung im Fahrtverlauf in der eher monotonen Fahrsituation auf der Autobahn.

Auf die eben beschriebene Art und Weise wurden für die Simulatoruntersuchung 17 verschiedene XML-Skripte erstellt. Diese teilten sich auf vier Versuchsgruppen mit jeweils vier Einzelfahrten und auf ein Trainingsszenario auf. Beide Aspekte werden in den folgenden Abschnitten zur Versuchsplanung (vgl. Kapitel 6.3.5) und zum Versuchsablauf (vgl. Kapitel 6.3.6) näher erläutert.

### 6.3.5 Versuchsplan

Wie aus dem Kapitel 6.3.2 hervorgeht, integrierte die Fahrsimulatorstudie Übergänge, die in Richtung Automation Verschiebungen der Fahrzeugkontrolle vom Fahrer auf den Systemmodus „ACC“, „Assistent“ oder „Pilot“ betrafen. Diesbezüglich interessierte, ob jene Aktivierung von unterschiedlich hohen Automatisierungsgraden Auswirkungen auf das Verhalten und die Bewertungen der Probanden haben. Zudem soll analysiert werden, ob die Art der Transition (direkt vs. indirekt) Effekte in den erhobenen Daten zeigt. Dabei galt es gleichfalls einen Übergang in einander sehr ähnliche Systemmodi zu integrieren. Dies betraf die Transition von „Assistent“ auf „Pilot“.

Weiterhin wurden in der Untersuchung Anwendungsfälle eingebunden, die aus dem Systemmodus „ACC“, „Assistent“ oder „Pilot“ mit Übergängen in Richtung Fahrer einhergingen (vgl. Abbildung 61). Bei den letzten beiden Modi galt es wiederum „indirekte Transitionen“ auf die Zwischenstufe „ACC“ zu integrieren. Des Weiteren erfolgte die Betrachtung des Übergangs aus „Pilot“ in das funktional ähnliche System „Assistent“.

Dies führt zu einem Versuchsdesign, welches sowohl in Richtung Automation als auch in Richtung Fahrer zwei Hauptfaktoren als unabhängige Variable variierte (vgl. Abbildung 70). Der Faktor A bezog sich auf den „**Grad der Kontrollverschiebung**“, der in der vorliegenden Arbeit über Transitionen von „Fahrer selbst“ zum Endmodus „ACC“ (A1), „Assistent“ (A2) oder „Pilot“ (A3) führte (vgl. Abbildung 70). In Richtung Fahrer betraf dies den umgekehrten Fall („Grad der Kontrollverschiebung“ = Startmodus).

Dabei ist zu beachten, dass das Transitionsmerkmal „**Ähnlichkeit von Systemmodi**“ bereits in diesen Übergängen enthalten ist. So schließt der schematische Versuchsplan der Abbildung 70 in Richtung Automation die Transition „Assistent-Pilot“ und in Richtung Fahrer „Pilot-Assistent“ mit ein. Das Kriterium wird folglich nicht gesondert als Faktor aufgenommen, sondern aus den erhobenen Daten entsprechend des Übergangs extrahiert.

Der Faktor B beinhaltete das Transitionsmerkmal „**Indirekte Transition**“ (vgl. Abbildung 70), welches sich über die Art der Transition in B1 „direkt“ und B2 „indirekt“ unterteilt.

Bezüglich der „**Richtung der Transition**“ ist erneut darauf hinzuweisen, dass dieses Merkmal zwar Bestandteil der Arbeit und damit der Versuchsplanung ist, jedoch die

Auswertung stets getrennt für die zwei Richtungen erfolgte. Daher geht das Kriterium nicht direkt in das Versuchsdesign ein.

**Transition in Richtung Automation**

		Faktor A: Grad der Kontrollverschiebung (Endmodus)		
		A1 "ACC"	A2 "Assistent"	A3 "Pilot"
Faktor B „Art der Transition“	B1 „direkt“	Y <sub>11</sub>	Y <sub>21</sub>	Y <sub>31</sub> *
	B2 „Indirekt“	-	Y <sub>22</sub>	Y <sub>32</sub>

**Transition in Richtung Fahrer**

		Faktor A: Grad der Kontrollverschiebung (Startmodus)		
		A1 "ACC"	A2 "Assistent"	A3 "Pilot"
Faktor B „Art der Transition“	B1 „direkt“	Y <sub>11</sub>	Y <sub>21</sub>	Y <sub>31</sub>
	B2 „Indirekt“	-	Y <sub>22</sub> *	Y <sub>32</sub>

\*Transitionen beinhalten das Merkmal „Ähnlichkeit von Systemmodi“ mit Übergang von „Assistent“ auf „Pilot“ oder umgekehrt

Abbildung 70: Versuchsplan der zweiten Studie, getrennt für die Richtung der Transition

### 6.3.6 Versuchsablauf

Der Versuchsplan aus Abbildung 70 wurde jedoch nicht 1:1 in der Fahrsimulatoruntersuchung umgesetzt. Es erfolgte eine **Übertragung in einen geeigneten Versuchsablauf**. Dieser sollte im Unterschied zur ersten Studie (vgl. Kapitel 5.3.6) die Varianz der Gruppenmittelwerte vom Gesamtmittelwert minimieren. So wurde hierbei versucht, die vier Systemmodi der Arbeit danach zu differenzieren, ob sie als Start- oder Endmodus fungieren. Auf jener Basis konnten Modusgruppen gebildet werden, die je nach Grad bzw. Art der folgenden Kontrollverschiebung alle Transitionsmerkmale einschlossen und somit die Beantwortung der Hypothesen ermöglichten.

Das resultierende Versuchsdesign ist in Abbildung 71 dargestellt und wird nachfolgend erläutert. In Abbildung 72 sieht man ergänzend dazu einen exemplarischen Ablauf der Testfahrten für die Modusgruppe „ACC“.

R

W

„Startmodus“ der Transition	„Endmodus“ der Transition			
	„FS“	„ACC“	„Assistent“	„Pilot“
Modusgruppe: „FS“	Y <sub>11</sub> *	Y <sub>12</sub>	Y <sub>13</sub>	Y <sub>14</sub>
Modusgruppe: „ACC“	Y <sub>21</sub>	Y <sub>22</sub> *	Y <sub>23</sub>	Y <sub>24</sub>
Modusgruppe: „Assistent“	Y <sub>31</sub>	Y <sub>32</sub>	Y <sub>33</sub> *	Y <sub>34</sub>
Modusgruppe: „Pilot“	Y <sub>41</sub>	Y <sub>42</sub>	Y <sub>43</sub>	Y <sub>44</sub> *

\*Hier erfolgt keine Transition, sondern nur eine Versuchsfahrt in der zugehörigen Modusgruppe.

Abbildung 71: Übertragung Versuchsplan (Abbildung 70) in einen geeigneten Versuchsablauf

Gemäß Abbildung 71 ergaben sich **vier Modusgruppen**, auf welche die Probanden der Simulatorstudie **randomisiert** verteilt wurden. Da die Stichprobe der zweiten Untersuchung insgesamt 80 Testpersonen umfasste (vgl. Kapitel 6.3.7), befanden sich folglich jeweils 20 Teilnehmer in der Gruppe „Fahrer selbst“, „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“. Die Zuordnung definierte diejenige Funktion, mit der die Probanden starteten und war gleichzeitig Ausgangspunkt für Transitionen in entsprechend höhere bzw. niedrigere Automationsstufen. Das heißt, die Probanden begannen stets mit dem jeweilig festgelegten Startmodus.

Sie absolvierten dann insgesamt **4 Fahrten** auf der Autobahn in Form einer **Wiederholungsmessung**. Die **erste Fahrt** beinhaltete dabei keine Transition. Sie diente dazu, dass sich die Testpersonen an den jeweiligen Modus gewöhnen. Mit Bezug zur Versuchsstrecke (vgl. Kapitel 6.3.4) dauerte dies ca. 15 min. Die Zeitspanne entspricht dabei ungefähr der Dauer, welche in der Vigilanzforschung als sensitiv für Einbußen in der Überwachungsleistung gilt und somit einen Grenzwert für Gewöhnungseffekte darstellt (Warm, Parasuraman & Matthews, 2008; Othersen, Petermann-Stock & Vollrath, 2014). In den **nachfolgenden drei Fahrten** fanden dann Übergänge in die anderen Systemmodi der vorliegenden Arbeit statt. Das bedeutet, dass jeder Testteilnehmer alle Automationsgrade erlebte und somit auch bewerten konnte. Dabei ist zu beachten, dass die Transition stets aus dem festgelegten Startmodus erfolgte (vgl. Abbildung 71). So absolvierten z.B. die Testpersonen der Gruppe „FS“ den ersten Durchgang ohne Assistenz und bekamen in den Folgefahrten Systemangebote in höhere Automatisierungsstufen (vgl. Abbildung 71). Hingegen erhielt die Gruppe „Pilot“ beim zweiten, dritten und vierten Durchgang Systemübergaben in Richtung Fahrer (vgl. Abbildung 71). Die Abbildung 72 stellt demgemäß einen beispielhaften Ablauf der vier Versuchsfahrten für einen Probanden und für den Startmodus „ACC“ dar.



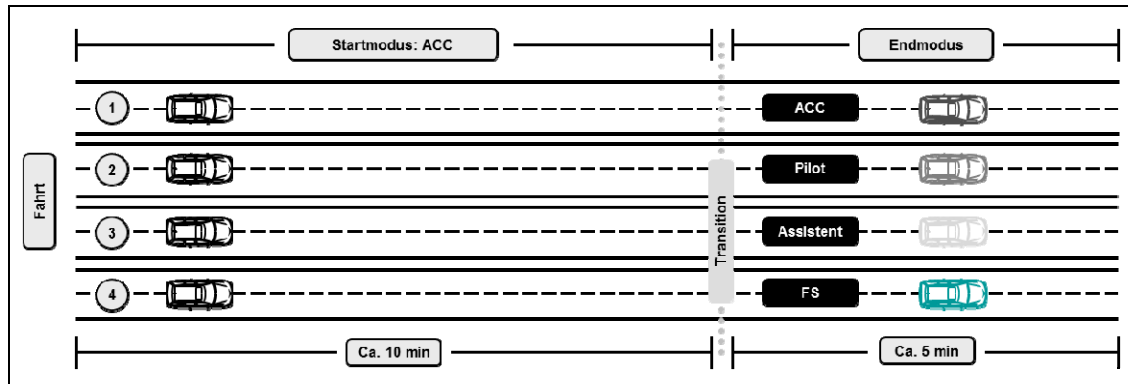


Abbildung 72: Exemplarischer Ablauf der Versuchsfahrten für die Modusgruppe „ACC“

Gemäß Abbildung 72 ereigneten sich die letzten drei Transitionen je Proband ungefähr auf dem letzten Drittel der Fahrtstrecke (nach ca. 10 min Fahrt). Demnach wurden die Testpersonen nicht ständig mit Systemangeboten oder Systemabwürfen konfrontiert. Ein derartiges Vorgehen hätte höchstwahrscheinlich einen kumulativen Effekt in negativer Ausprägung auf den Umgang mit den Modi sowie deren subjektive Bewertung gehabt.

Die Reihenfolge der Übergänge in der zweiten, dritten und vierten Versuchsfahrt und damit die Festlegung des Endmodus der Transition wurden mittels **lateinischen Quadrats zyklisch permutiert** (Bortz & Döring, 1995). Hintergrund des verwendeten Verfahrens war die Vermeidung eines Reihenfolgeeffekts, der bei einem Messwiederholungsdesign aufgrund der Positionierung der experimentellen Bedingungen auftreten kann (Bortz & Döring, 1995). Von einem Versuchsplan mit vollständiger Ausbalancierung der Haupt- und Interaktionseffekte wurde aus Effizienzgründen abgesehen. Im konkreten Fall hätten sich analog zu den Transitionen bereits sechs Permutationsfolgen ( $3! = \text{Fakultät } 3$ ) ergeben. Die benötigte Stichprobengröße wäre dann in Kombination mit der Probandenanzahl je Modusgruppe exponentiell angestiegen. Daher fiel die Wahl auf ein Testdesign mit unvollständiger Ausbalancierung. Hierbei werden zwar nicht alle Kombinationen berücksichtigt, eine Kontrolle von Störvariablen kann aber dennoch stattfinden. So wurde mittels zyklischer Permutation gewährleistet, dass jedes Treatment genau einmal auf jeder Reihen-Position vorkommt. Eine Ausnahme bildete diesbezüglich die erste Simulatorfahrt, die immer im festgelegten Startmodus erfolgte. Demgemäß entstanden nur drei Permutationsabfolgen (1-2-3, 2-3-1, 3-1-2), welche dann wiederholt gemessen wurden.

Abschließend ist mit Bezug zum Kapitel 6.3.2 zu erwähnen, dass bei den Modusgruppen „Assistent“ und „Pilot“ zusätzlich eine randomisierte Verteilung dahingehend erfolgte, ob die Transition auf „ACC“ über den Modus „Fahrer selbst“ stattfand oder nicht (vgl. Kapitel 6.3.4, Abbildung 68). Hintergrund dessen war die Frage, ob sich durch diese Gestaltung des Über-

gangs Unterschiede zur indirekten Transition auf „ACC“ ergeben. Dies betraf jeweils zehn Testpersonen. Gleiches galt für den Übergang von „Pilot“ auf „Assistent“, welcher sich ebenfalls für zehn Probanden nach einer vorausgehenden, vollständigen Deaktivierung des „Pilot-Modus“ ereignete. In beiden Fällen erfolgte das Systemangebot ca. 3 s nach der zwischen-geschalteten Kontrollübernahme.

Unter Berücksichtigung der vier Fahrten von je 15 min Länge (vgl. Abbildung 72) betrug die reine **Fahrtzeit** ungefähr eine Stunde. Der gesamte Versuch dauerte 2.5 Stunden je Proband. Die Gründe hierfür sind in Tabelle 25 anhand der einzelnen Ablaufpunkte für die Simulatorstudie dargestellt. Diese umfassten neben den Testfahrten die Arbeiten für die biophysiological Messung, Eingewöhnungs- bzw. Trainingsfahrten und das Ausfüllen von Fragebögen. Infolge der Untersuchungsdauer konnten letztlich **fünf Probanden je Versuchstag** getestet werden. Dies bestätigte ebenso der Vorversuch mit vier Teilnehmern, der vor dem Beginn der Studie zur abschließenden Testung des Versuchs durchgeführt wurde.

Bezüglich der in Tabelle 25 benannten **Trainingsfahrt** ist anzumerken, dass diese einerseits als Übungsphase für die Fahrsituationen sowie für exemplarische Transitionen diene. Jene Testszenarien ähnelten den später Folgenden. Beispielsweise kam es hier zu einer Auffahrsituation mit einem Hund, der plötzlich über die Fahrbahn lief und eine Übernahmeaufforderung an den Fahrer auslöste. Diese latente Szenariendarstellung ermöglicht die Argumentation, dass die im Fahrversuch dokumentierten Reaktionen der Testteilnehmer nicht auf mangelndes Training bzw. erhöhte Beanspruchung durch die Unbekanntheit der Situation zurückzuführen sind.

Andererseits diene die Trainingsfahrt dazu, die Funktionalität der vier Systemmodi auf spielerische Art und Weise kennenzulernen. So konnten die Probanden beispielsweise versuchen, die Spurhaltung des Modus „Pilot“ durch Eingriffe in die Lenkung zu beeinflussen und somit die Regelung des Systems zu erleben. Bezüglich der Stufe „FS“ hatten die Fahrer zudem die Gelegenheit, die maximal zu fahrende Geschwindigkeit von 110 km/h zu trainieren. Als Unterstützung diene hierbei ein in der Simulation angezeigtes, rotes Dreieck. War dessen Pfeilspitze nach unten gerichtet, bedeutete dies langsamer zu fahren. Im umgekehrten Fall musste beschleunigt werden. Entsprach die Geschwindigkeit ungefähr 110 km/h (+/- 5 km/h) verschwand das Dreieck.



Tabelle 25: Versuchsablauf der Fahrsimulatorstudie je Proband

Ablauf	Inhalt	Zeitdauer
Ankunft der Probanden	Smalltalk	5 min
Vorbereitung biophysio- logische Messung	Anlegen der Elektroden (Elektrodermale Aktivität, Elektrokardiogramm), des Temperatursensors und Atemgurts	10 min
Fragebogen A	Ausfüllen der Vorbefragung und Lesen der einführenden Instruktion	10 min
1. Biophysiological Messung	1. Ruhemessung	1 min
Eingewöhnungsfahrt	Simulatorfahrt zu Minimierung der „Simulator Sickness“ (vgl. z.B. Hoffmann, Krüger & Buld, 2003)	3 min
Trainingsfahrt	Kennenlernen exemplarischer Fahrsituationen und der vier Systemmodi	8 min
1. Versuchsfahrt	1. Simulatorfahrt im laut Versuchsdesign festgelegten Startmodus	15 min
Fragebogen B1	1. Abschnittsbefragung	8 min
2. Versuchsfahrt	2. Simulatorfahrt mit Transition in den laut Versuchsdesign festgelegten Endmodus	15 min
Fragebogen B2	2. Abschnittsbefragung	8 min
3. Versuchsfahrt	3. Simulatorfahrt mit Transition in den laut Versuchsdesign festgelegten Endmodus	15 min
Fragebogen B3	3. Abschnittsbefragung	8 min
4. Versuchsfahrt	4. Simulatorfahrt mit Transition in den laut Versuchsdesign festgelegten Endmodus	15 min
Fragebogen B4	4. Abschnittsbefragung	8 min
2. Biophysiological Messung	2. Ruhemessung	1 min
Fragebogen C	Abschlussbefragung	10 min
Nachbereitung bio- physiologische Messung	Entkabelung und Entfernung der Elektrodenpaste	5 min
Verabschiedung der Probanden	Übergabe Geschenk als Dankeschön für die Teilnahme	5 min
<b>Σ Versuchsdauer: 150 Minuten</b>		

### 6.3.7 Stichprobe

Die Stichprobe der zweiten Untersuchung setzte sich aus 80 männlichen Versuchspersonen zusammen. Weibliche Probanden blieben unberücksichtigt, um das komplexe Versuchsdesign nicht zusätzlich durch den Faktor „Geschlecht“ zu erweitern sowie die Personenvarianz möglichst gering zu halten. Die Teilnehmer waren Mitarbeiter der Volkswagen AG und kamen vorwiegend aus den Bereichen Marketing, Vertrieb, Produktion, Qualitätssicherung sowie technische Entwicklung. Sie wurden über den Volkswagen Probandenpool telefonisch rekrutiert. Die Unterstützung bei der Studie erfolgte auf freiwilliger Basis und

zumeist außerhalb der Arbeitszeit. Die Testpersonen konnten sich als Dankeschön für ihre Teilnahme ein Geschenk in Höhe des investierten Aufwands aussuchen.

Das **Alter** der Probanden betrug im Durchschnitt 36 Jahre ( $SD = 6.21$ ), wobei das Minimum bei 25 Jahren und das Maximum bei 48 Jahren lag.

Die durchschnittliche **Fahrleistung** aller Versuchspersonen umfasste 18887.50 km pro Jahr ( $SD = 912.62$ ). Davon können 27 der 80 Probanden (33.75 %) als Vielfahrer (>20000 km/Jahr) nach Fastenmeier (1995) klassifiziert werden. In Bezug auf die Jahresfahrleistung wurde anteilig jeweils ein Drittel (33.3 %) auf der Landstraße, in der Stadt und auf der Autobahn zurückgelegt.

Die **Nutzungshäufigkeit von Fahrerassistenzsystemen** auf jenen Fahrten fiel relativ gering aus. So gaben die Versuchsteilnehmer an, derartige Funktionen weniger zu nutzen bzw. diese nicht in ihrem Privatfahrzeug zu haben (vgl. Tabelle 26). Im Vergleich zur Stichprobe der ersten Studie ist die Erfahrung der Probanden im Umgang mit Fahrerassistenzsystemen allerdings etwas höher einzustufen (vgl. Tabelle 26 vs. Tabelle 18). Dies betrifft neben dem Tempomat auch das ACC. Die Unterschiede in der Häufigkeit der Nutzung sind in der Simulatoruntersuchung wahrscheinlich durch die Teilnahme zahlreicher Fahrer mit Dienstwagen bedingt.

Tabelle 26: Vorhandensein und Nutzungshäufigkeit ausgewählter FAS

„Haben Sie mit den folgenden FAS Erfahrungen aus Ihrem Fahrzeug?“	Tempomat	ACC	Lane Departure Warning	Heading Control
<b>ja</b>	90 %	39 %	11 %	13 %
<b>nein</b>	10 %	61 %	89 %	88 %
„Wie häufig nutzen Sie diese FAS?“	Tempomat	ACC	Lane Departure Warning	Heading Control
<b>oft</b>	55 %	1 %	-	1 %
<b>gelegentlich</b>	30 %	30 %	10 %	6 %
<b>nie</b>	15 %	69 %	90 %	92 %

Infolge des beruflichen Hintergrunds der Testpersonen konnte darüber hinaus eine etwas höher ausgeprägte Technikaffinität nachgewiesen werden. Diese wurde analog zur ersten Studie auf der Basis der Kurzform des Persönlichkeitsfragebogens von Beier (2004) zur Erhebung der **Kontrollüberzeugungen im Umgang mit Technik** (KUT) gewonnen (vgl. Erläuterungen in Kapitel 5.3.7).

Die Verteilung des Merkmals innerhalb der Stichprobe der zweiten Untersuchung ist in Abbildung 73 (links) in Form eines Boxplots dargestellt. Die Skalierung der Ordinate korreliert mit dem Wertebereich des KUT-Fragebogens, der nach Aufsummierung der Itemwerte von „1“ („stimmt gar nicht“) bis „5“ („stimmt völlig“) minimal acht und maximal 40 Punkte umfasste. Je niedriger der KUT-Gesamtwert der Probanden war, desto geringer fiel demgemäß deren Kontrollüberzeugungen im Umgang mit Technik aus. Im vorliegenden Fall lag der Median der Verteilung innerhalb der Stichprobe bei 24, das Minimum bei 18 und das Maximum bei 30 Punkten (vgl. Abbildung 73, links).

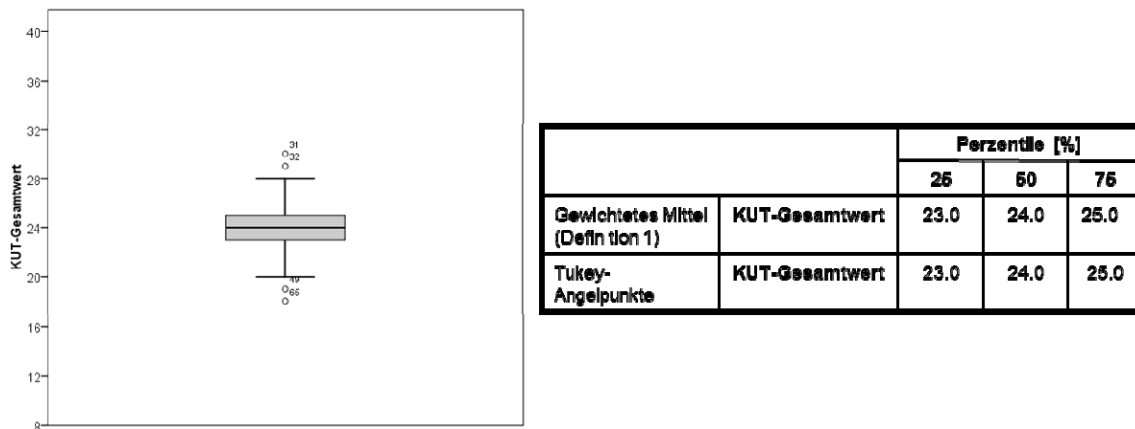


Abbildung 73: Verteilung des KUT-Gesamtwertes innerhalb der Stichprobe der zweiten Studie (links), inklusive 25 %, 50 %, 75 % Perzentile (rechts)

Im Gegensatz zur ersten Studie (vgl. Abbildung 45) ließ sich im Simulatorversuch keine systematische Verschiebung der KUT-Werte aufgrund eines Decken- oder Bodeneffektes feststellen ( $\chi^2 [2, N = 80] = 3.78; p = .151$ ). Daher könnten die Probanden in KUT-Gruppen (niedrig-mittel-hoch) unter Berücksichtigung der Perzentil-Verteilung gegliedert und in der statistischen Analyse als Kovariable einbezogen werden. Da das Persönlichkeitsmerkmal allerdings eher mit globalen Einstellungen zur Automatisierung korreliert (Beier, 2004; Ohlemüller, 2009) und daher weniger das Bewusstsein für den Automatisierungsgrad sowie einhergehende Erwartungen moduliert, bleibt es in der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt.

In Ergänzung zu den bereits genannten Items, wurden die Probanden vor Versuchsbeginn zu ihrem aktuellen Zustand bzw. Befinden gefragt (vgl. Anhang). Diesbezüglich gaben  $N = 52$  Testteilnehmer zu ihrem **Schlafverhalten** an, weder zu wenig, noch zu viel in der letzten Nacht geschlafen zu haben. Die übrigen 28 Personen hatten im Mittel eine Stunde zu wenig geruht ( $SD = 1.06$ ). Ein derartiges Schlafdefizit konnte für den vorliegenden Versuch toleriert werden.

Die Probanden zeigten zudem keine Auffälligkeiten im **Medikamentenkonsum**. Die von acht Personen am Tag der Untersuchung eingenommenen Arzneimittel (z.B. Insulin, Sulfalazin) sollten keinen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der erhobenen biophysiologicalen Daten haben (vgl. Kapitel 6.4.3).

Die Veränderungen im subjektiven **Befinden der Fahrer** vor und nach der Versuchsfahrt sind in Abbildung 74 anhand der Skalen „Allgemeine Erschöpfung“, „Motivationsbereitschaft“ sowie „Schläfrigkeit“ dargestellt. Deren Erhebung basierte wiederum auf der modifizierten Form des SOFI (vgl. Anhang), welches bereits in der Realfahrtstudie verwendet wurde (vgl. Kapitel 5.3.7).

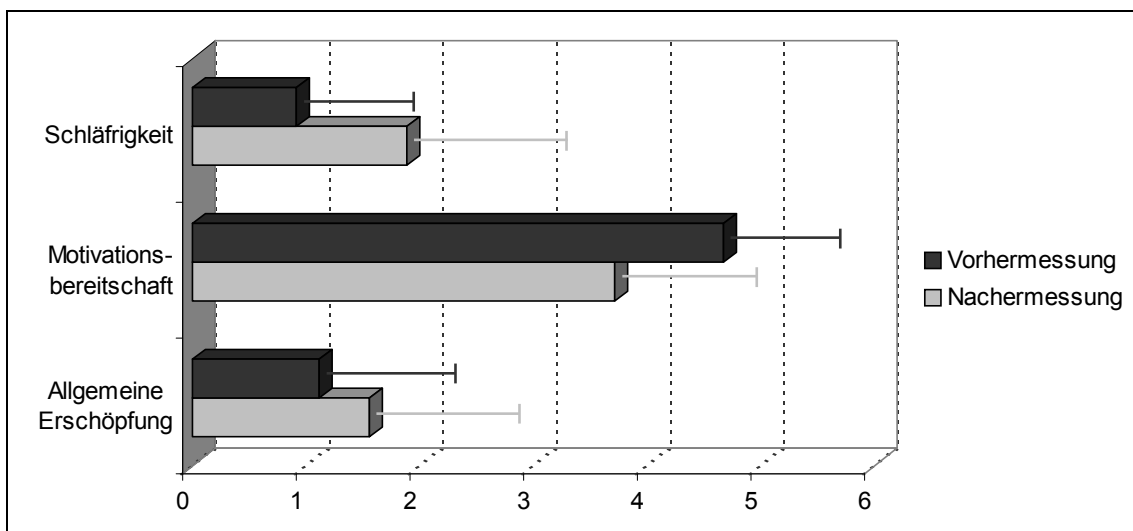


Abbildung 74: Vorher- und Nachermessung auf den SOFI-Skalen „Schläfrigkeit“, „Motivationsbereitschaft“ und „Allgemeine Erschöpfung“

Die Abweichungen zwischen der Vorher- und Nachermessung in Abbildung 74 weisen darauf hin, dass die Probanden am Versuchsende etwas müder, weniger motiviert und leicht erschöpft waren. Diese Unterschiede im subjektiven Befinden zeigten für die Faktoren „Motivationsbereitschaft“ ( $T[78] = 0.95$ ;  $p < .000$ ), „Allgemeine Erschöpfung“ ( $T[77] = -0.44$ ;  $p < .000$ ) und Schläfrigkeit ( $T[78] = -0.98$ ;  $p < .000$ ) statistisch hoch signifikante Ergebnisse. Mit Bezug zur Antwortskala von 0 („trifft gar nicht zu“) bis 6 („trifft sehr stark zu“) liegen die Mittelwerte jedoch in einem ähnlichen Wertebereich. Da dieser qualitativ nahezu das Gleiche ausdrückt, sollten die Befindensunterschiede über den Verlauf der Testfahrten nicht ins Gewicht gefallen sein. Sie werden daher nicht gesondert betrachtet.

## 6.4 Datenbasis

In diesem Kapitel finden sich in den nachfolgenden Abschnitten Erläuterungen zu den erfassten Videodaten (Kapitel 6.4.1), Fahrdaten (Kapitel 6.4.2), biophysiologicalen Daten

(Kapitel 6.4.3), Fragebogendaten (Kapitel 6.4.4) sowie Versuchsleiterprotokollen (Kapitel 6.4.5). Jene werden im Kapitel 6.4.6 nochmals zusammenfassend dargestellt.

#### 6.4.1 Videodaten

Zur Visualisierung des Fahrerverhaltens dienten insgesamt vier Netzwerkkameras (Axis 211A). Zwei von diesen waren nahe der beiden A-Säulen der Sitzkiste mit Orientierung auf den Probanden angebracht. Eine Kamera wurde auf das Display mit den Systemzustandsanzeigen gerichtet (vgl. Abbildung 75, links). Eine weitere zeichnete die Simulatorfahrt aus der Perspektive des Fahrers auf. Die Positionierung der Netzwerkkameras, inklusive der mittels Quad Split erhaltenen vier Videobilder, ist in Abbildung 75 anschaulich dargestellt.

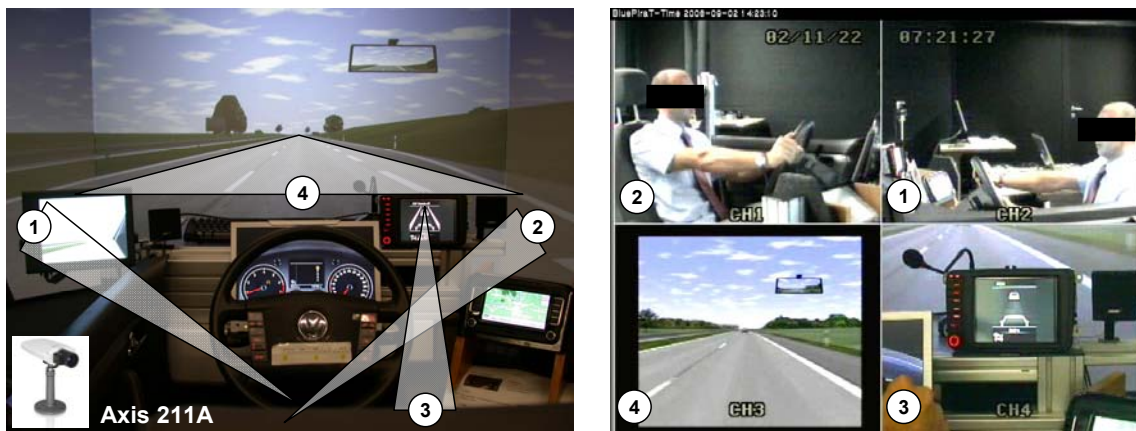


Abbildung 75: Ausrichtung und Positionierung der vier Netzwerkkameras im Fahrsimulator

Die Videodaten wurden über einen Datenlogger der Telemotive AG (blue PiraT) im MPEG4 Format aufgezeichnet. Die hierbei zugrunde gelegte Framerate betrug 30 Frames pro Sekunde (Bildauflösung: 320x240 Pixel). Infolge der Versuchsdauer je Proband (vgl. Tabelle 25) fand die Speicherung der Daten in mehreren Videodateien statt.

Die **Auswertung des Videomaterials** erfolgte analog zur ersten Studie mit dem Programm VirtualDub (Version 1.8.6). Hierfür mussten die Daten zunächst in das Format AVI (Audio Video Interleave) konvertiert werden. Darüber hinaus wurden die einzelnen Videodateien einer Versuchsperson zu einem kompletten Film zusammengeschnitten und Wechsel von Fahrabschnitten gesondert markiert. Die auf jene Weise erhaltenen Videos dienten dann als Grundlage, um das Blickverhalten der Probanden in Übergabe- und Übernahme-situationen frameweise zu analysieren. Entsprechend der Realfahrtstudie (vgl. Kapitel 5.4.1) waren dabei folgende Kenngrößen ausschlaggebend, die zum Zeitpunkt der Transition aus den Blicken der Testpersonen auf die Systemzustandsanzeige resultierten (vgl. Status-Display in Abbildung 63, links):

- **Anzahl und Nummer der Blicke** (Einzelblicke)
- **Blickdauer** (gesamt, einzeln)

Im Unterschied zur Realfahrtstudie wurden Blicke über 1.5 s Dauer bei maximal drei Blicken nicht näher betrachtet. Hintergrund dessen ist, dass das Blickverhalten der Probanden im Fahrsimulator vom dem im realen Verkehrsgeschehen abweicht (Cohen, 1998). Blicke über 1.5 Sekunden sind aufgrund der geringeren Kritikalität des Versuchssettings in simulierten Umgebungen nicht unwahrscheinlich.

Darüber hinaus wurden die Videodaten zur Überprüfung und zum Nachvollziehen der erhobenen Fahrdaten genutzt, die nachfolgend erläutert werden.

#### 6.4.2 Fahrdaten

Die Fahrdaten wurden in der Simulatoruntersuchung zeitsynchron zur Videoaufzeichnung mit dem bluePiraT geloggt. Sie enthielten Nachrichten des **Antriebs-** und des **Komfort-CAN**. Die darin abgebildeten Kenngrößen dienten als Basis für Aussagen über die Fahrer- bzw. Fahrzeugreaktionen. Hierbei war insbesondere die Dokumentation derjenigen Zeitpunkte wichtig, zu denen Systemangebote erfolgten oder Übergänge in Richtung Fahrer stattfanden. Automatisch gesetzte Markerpunkte bei der fahrerseitigen Bestätigung von Systemangeboten bzw. bei systemseitig initiierten Veränderungen des Systemzustands unterstützten diesbezüglich die Auflösung der relevanten Abschnitte für die Datenauswertung (vgl. Kapitel 6.3.3).

In den generierten Datenfiles wurden zudem Informationen aus der Verkehrssimulation integriert (z.B. Objekt mit der ID 13 erscheint), welche die Zuordnung der skriptgesteuerten Ereignisse ermöglichte (vgl. Kapitel 6.3.4). Die Daten lagen im Anschluss an die Aufzeichnung im ASCII-Format vor. Sie umfassten neben Zeit- und Datumsstempeln wesentliche Parameter aus der Simulation und den zwei CAN-Bussystemen.

Für die inferenzstatistische Auswertung interessierten vor allem die in Tabelle 27 aufgelisteten Werte. Deren Analyse erfolgte zum einen mit dem Statistikprogramm SPSS und zum anderen mit der Software MatLab (Matrix Laboratory, Version 2007) des Unternehmens The MathWorks, Inc. MatLab. Letzteres diente dabei zur grafischen Darstellung des Fahrer- bzw. Fahrzeugverhaltens (vgl. Kapitel 6.5).

Tabelle 27: Relevante Kennwerte für die Analyse der Fahrdaten der zweiten Studie

Laterale und longitudinale Fahrzeugkennwerte aus dem Antriebs-CAN	Einheit
Lenkradwinkel	[°]
Querposition auf der Fahrspur	[m]
Fahrgeschwindigkeit	km/h
Längsbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
Fahrzeugkennwerte aus dem Komfort-CAN	Einheit
Aktueller Systemzustand [FS, ACC, Assist, Pilot]	-
Veränderung durch Systemangebot	-
Veränderung durch Übernahmeaufforderung	-

Analog zur ersten Studie (vgl. Kapitel 5.4.2) interessierte bei der Auswertung der Daten wiederum die Differenzierung zwischen **Aktivierungs- und Übernahmedauern** (vgl. Tabelle 28). Nicht transparente oder unerwartete Übergänge sollten sich demnach in verzögerten oder ausbleibenden Reaktionen bei der Bestätigung eines Systemangebots bzw. bei der Übernahme der Fahrzeugkontrolle niederschlagen. Die ausgewerteten Abschnitte umfassten dabei stets Signalverläufe, die ca. **fünf Sekunden vor und 12 Sekunden nach der jeweiligen Transition** entstanden sind.

Tabelle 28: Parameterberechnung aus Fahrzeugkennwerten für Reaktionszeitanalyse

Parameter aus Fahrdaten	Einheit	Operationalisierung
<b>Aktivierungsdauer</b>	[s]	Zeitdauer vom fahrzeugseitigen Systemangebot bis zur Bestätigung dessen durch den Fahrer mittels Lenkradtaste
<b>Übernahmedauer</b>	[s]	Zeitdauer von der Übernahmeaufforderung des Systems bis zur ersten Reaktion des Fahrers in Längs- bzw. Querrichtung des Fahrzeugs

Neben diesen zeitlichen Aspekten konnten zudem Auffälligkeiten aus der grafischen Darstellung der Fahrdaten mit MatLab auf quantitative Unterschiede überprüft werden.

### 6.4.3 Biophysiologicalische Daten

Als Erweiterung zur ersten Studie wurden in der Simulatoruntersuchung biophysiologicalische Messungen durchgeführt. Hintergrund dessen war, dass derartige Biosignale Rückschlüsse auf die mentale Beanspruchung des Menschen und somit auf psychische Erlebensprozesse ermöglichen (vgl. De Waard, 1996; Manzey, 1998; Richter & Hacker, 1998; Hering, 1999; Ribback, 2003). So treten in Abhängigkeit von der Schwierigkeit bzw. Komplexität zu erfüllender Aufgaben sowie von personellen Leistungsvoraussetzungen (z.B. überdauernde Disposition, Motivlagen) spezifische, physiologische Reaktionsmuster auf (vgl.

Lacey, 1967; Fahrenberg, 1983, Gaillard & Kramer, 2000). Jene spiegeln in Analogie zum Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach Rohmert (1984) die Aktivierung von Leistungsfunktionen des menschlichen Informationsverarbeitungssystems wider. Entscheidende Determinanten für die Höhe und die Art der Aktivierung („Arousal“) sind dabei verfügbare Kapazitätsreserven (vgl. Kahneman, 1973; Norman & Bobrow, 1975; Shiffrin & Schneider, 1977; Wickens, 1984), Handlungs- und Entscheidungsspielräume (Karasek & Theorell, 1990; Richter & Hacker, 1998) sowie kognitiv-energetische Prozesse (vgl. Pribram & Mc Guinness, 1975; Luczak, 1987; Hockey, 1997; Boucsein, & Backs, 2000). Bei kurzfristigen Belastungen treten zudem ergonomische Faktoren hinzu (Rohmert, 1984). Jene bestimmen beispielsweise über die Passung des mentalen Modells des Operators mit den tatsächlichen Abläufen des Systems die aufgabenspezifische Belastung, welche über definierte Beanspruchungsindikatoren operationalisierbar ist (Eyferth, 1995). In diesem Zusammenhang haben mehrdimensionale Aktivierungstheorien zur Möglichkeit der Identifizierung psychophysiologischer Beanspruchungszustände über Begleitreaktionen des zentralen und autonomen Nervensystems geführt (vgl. hierzu das integrative Modell mehrdimensionaler Aktivierungstheorien nach Boucsein, 2006). Ein Beispiel hierfür ist die **Orientierungsreaktion** (Sokolov, 1960). Jene geht zur Fokussierung der Aufmerksamkeit mit folgenden neurophysiologischen Prozessen einher (Schandry, 1998) und wird durch das sogenannte Affect-Arousal-System gesteuert (Pribram & Mc Guinness, 1975; Boucsein, & Backs, 2000):

- Hautleitfähigkeitserhöhung
- Absinken der Herzrate
- Vasokonstriktion der peripheren Blutgefäße
- Vasodilatation der Kopfgefäße
- Alpha-Blockade im Elektroenzephalogramm
- Absinken der P300-Komponente im evozierten Hirnpotenzial

Eine vergleichbare Zuordnung biophysiologischer Indikatoren zu spezifischen Beanspruchungs- bzw. Aktivierungszustände wurde ebenfalls in der vorliegenden Arbeit angestrebt. Der Fokus lag hierbei auf der explorativen **Analyse von Begleitreaktionen des vegetativen Nervensystems in den untersuchten Transitionssituationen**. Diesbezüglich stellte sich die Frage, ob nutzerseitig schwer nachvollziehbare oder unerwartete Übergänge von denen differieren, die transparent und erwartungskonform sind. Unter Beachtung des psychophysischen Kovariationsproblems (Fahrenberg, 1979), welches die Divergenz zwischen physiologischen, subjektiven und objektiven Leistungsmaßen beschreibt, fand dafür eine Erfassung mehrerer Biosignale statt. Jene werden im Folgenden erläutert und die daraus verwendeten Kenngrößen in Bezug zu ihrer bisherigen Eignung für die ingenieurs-



psychologische Beanspruchungsforschung gesetzt. Vorab sei darauf hingewiesen, dass alle Daten mit dem gleichen **Messsystem** in der Simulatorstudie erhoben wurden. Hierbei handelte es sich um NeXus 10.0 der Mind Media B. V. Dies ist ein computergestütztes Biofeedbacksystem mit zehn Kanälen zur Erfassung einer Bandbreite biophysiologicaler Signale. Deren Aufzeichnung erfolgt mit einer 24 Bit Daten-Auflösung. Die Dokumentation, Visualisierung und Auswertung findet hingegen mit Hilfe der Software Biotrace statt. Dafür besitzt das verwendete Gerätesystem eine Bluetooth Anbindung. Im vorliegenden Fall konnten somit die Signalverläufe in Echtzeit auf dem Messlaptop (vgl. Abbildung 63, rechts) dargestellt und deren Aufzeichnung kontrolliert werden. Sie waren zeitsynchron zu den Video- und Fahrdaten. Spezifische Ereignisse wie z.B. Transitionen wurden während den Versuchsfahrten über Triggerpunkte in den Signalen markiert und beschriftet. Dies ermöglichte eine widerspruchsfreie Auswertung der biophysiologicalen Daten innerhalb eines **Zeitfensters** vor und nach dem Übergang. Dieses betrug für die Berechnung der Werte ca. 17 Sekunden und umfasste den Abschnitt fünf Sekunden vor und 12 Sekunden nach der relevanten Transition (vgl. Fahrdaten, Kapitel 6.4.2).

### **Elektrodermale Aktivität (EDA)**

Die EDA oder auch galvanische Hautreaktion gehört zu den peripherphysiologischen Maßen des autonomen Nervensystems. Sie ist ein wichtiger Indikator für psychische Prozesse des Menschen (Schandry, 1998). Das Biosignal bezieht sich auf die systematische Veränderung des elektrischen Hautleitwerts, welche mit der Sympathikusaktivität der ekkrinen Schweißdrüsen bei Aktiviertheit einer Person oder bei thermoregulatorischen Prozessen zusammenhängt (Boucsein, 1992). Als **Ableitorte** eignen sich die Hand- oder Fußinnenflächen (palmare vs. plantare Ableitung). Letztere werden insbesondere bei Messungen während der Ausführung manueller Tätigkeiten bevorzugt. Die Abbildung 76 (links) zeigt demgemäß die Positionierung der Elektroden auf der Hautoberfläche des Fußes. Unter Verwendung einer isotonischen Paste fließt zwischen diesen beiden ein schwacher Gleichstrom (Konstantspannungsprinzip, nach Boucsein, 1992), dessen Veränderungen als EDA in der Einheit Mikrosiemens ( $\mu\text{S}$ ) registrierbar sind. Um Polarisationsphänomene zu vermeiden, werden typischerweise nicht polarisierbare Silber-/Silberchloridelektroden genutzt, deren Fläche etwa  $1\text{ cm}^2$  betragen.

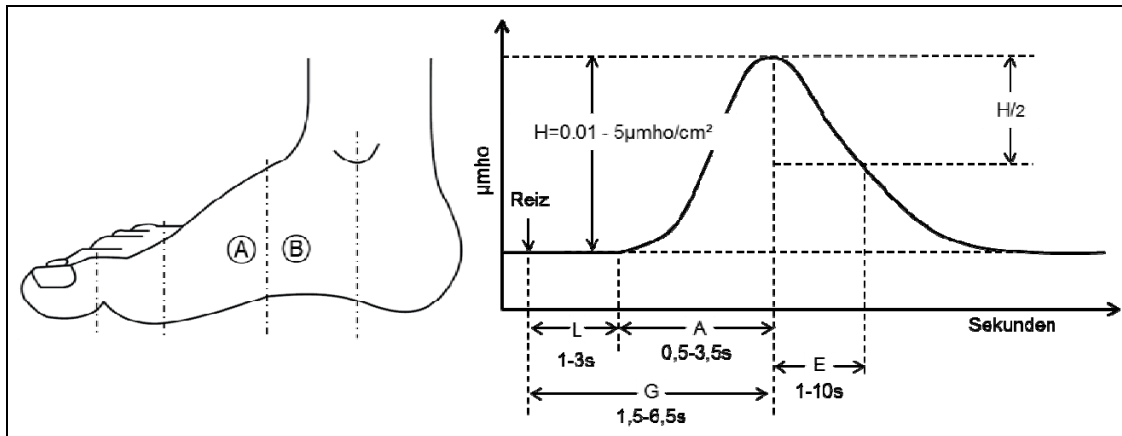


Abbildung 76: EDA-Ableitorte an der Fußinnenseite A & B (links, Boucsein, 1992; modifiziert) und typischer Verlauf Hautleitfähigkeitsreaktion mit  $H$  = Amplitude,  $L$  = Latenzzeit,  $A$  = Anstiegszeit,  $G$  = Gipfelzeit,  $E$  = Erholungszeit (rechts, Schandry, 1998; modifiziert)

Die mittels der bipolaren Ableitung erhaltenen exosomatischen Kenngrößen sind in tonischen und phasischen Maßen beschreibbar. Zu den wichtigsten **tonischen Parametern** gehören dabei das Hautleitfähigkeitsniveau (skin conductance level, SCL) und Anzahl der Spontanfluktuationen der EDA (non-specific skin conductance responses, NS.SCRs). Sie stehen eher in Zusammenhang mit der allgemeinen Aktiviertheit und bilden emotionale Beanspruchungs- sowie Stresszustände ab (Boucsein, 1992).

Die bedeutsamsten **phasischen Kennwerte** der Hautleitfähigkeit betreffen die Hautleitfähigkeitsreaktion (skin conductance reaction, SCR). Im Unterschied zu den Spontanfluktuationen tritt sie nicht unspezifisch auf, sondern als Reaktion (Orientierungsreflex, Habituation) auf einen äußeren Reiz. Die Form des Reaktionsverlaufes ist nicht immer einheitlich, geht jedoch stets mit einer Leitwerterhöhung einher. Diese kann nach Schandry (1998) anhand von Reaktionsgrößen beschrieben werden. Jene sind in Abbildung 76 (rechts) mit den jeweiligen Wertebereichen dargestellt und werden nachfolgend kurz aufgelistet:

- **Amplitude** (Höhe der Reaktion)
- **Latenzzeit** (Zeit zwischen Reizbeginn und Fußpunkt der Reaktion)
- **Anstiegszeit** (Zeit vom Fußpunkt bis zum Gipfel der Reaktion)
- **Gipfelzeit** (Zeit vom Reizbeginn bis zum Gipfel der Reaktion)
- **Erholungszeit** (halbe Abstiegszeit)

Bevor derartige Reaktionsverläufe auswertbar sind, muss in der Regel eine visuelle Inspektion der EDA-Daten erfolgen. Schwerpunkt hierbei ist der Ausschluss von Artefakten, die zumeist durch Schwankungen in der Körpertemperatur, durch die Atmung oder durch Bewegungen im Bereich der Ableitorte entstanden sind (Boucsein, 1992). Letztere führen typischerweise zu Sprüngen im Kurvenverlauf, die gut von den exponentiell ansteigenden

SCRs unterscheidbar sind. Atemartefakte (z.B. Seufzeratmung) treten hingegen ein bis drei Sekunden nach dem Einatmungsvorgang auf und decken sich daher mit der Latenzzeit (vgl. Abbildung 76, rechts).

Nach der Bereinigung der Rohdaten um die Artefaktintervalle kann die Bestimmung der einzelnen Parameter erfolgen (vgl. Schandry, 1998; Dawson, Schell & Filion, 2007). Diesbezüglich empfiehlt es sich, ein minimales **Amplitudenkriterium** festzulegen. Abhängig vom Auflösungsvermögen haben sich hierbei Werte von 0,01 bis 0,10  $\mu\text{S}$  bewährt (Boucsein, 1992). Überlappen sich EDA-Kurven, muss in der Senke zwischen den beiden Gipfelpunkten ein neues Grundniveau für die zweite Reaktion festgesetzt werden (vgl. Boucsein, 1992).

Häufig variiert zudem die Amplitudenhöhe zwischen den Versuchspersonen. Grund dafür ist eine unterschiedliche Endorganreaktivität (Foerster, Schneider & Walschburger, 1983), infolge derer einige Probanden sehr viele und andere keine spontanen Veränderungen der Hautleitfähigkeit zeigen (Vossel, 1990).

Für die **Eignung der EDA als Beanspruchungsindikator** liegen vorwiegend Studien mit Bezug zu emotionalen Aspekten der menschlichen Informationsverarbeitung vor (Boucsein, 1992 und Ribback, 2003). Verbindungen zu mentalen Beanspruchungskomponenten lassen sich allerdings gleichfalls belegen. So weist Boucsein (1992) daraufhin, dass sich die Amplitude und die Erholungszeit der SCR als sensitiv zur Identifizierung von Orientierungsreaktionen zeigen. Zudem konnte Furedy (1993) einen Zusammenhang zwischen erhöhter Aufmerksamkeit und einem Anstieg elektrodermalen Aktivität nachweisen. Weitere Untersuchungen (z.B. Reaktionszeitexperimente) belegen, dass bei zunehmender mentaler Beanspruchung ein Anstieg der EDA zu verzeichnen ist (Ribback, 2003). Dies betrifft vor allem das Hautleitfähigkeitsniveau, aber auch die Hautleitfähigkeitsreaktion (vgl. Straube et al., 1987; Walschburger, 1991; Hörhold, 1994). Studien aus dem Automobilbereich stellen darüber hinaus fest, dass die EDA in Abhängigkeit unterschiedlicher Fahr-situationen variiert (Helander, 1978), die Wirkung verschiedener Warnsignale abbildet (Fritz, 2006) und bei hoher mentaler Konzentration steigt (Zeier, 1979; Verwey, & Veltman, 1996).

Grundsätzlich kann demnach festgehalten werden, dass der Parameter sensitiv für die kognitive Beanspruchung ist und den physiologischen Aktiviertheitszustand widerspiegelt. Er sollte allerdings nicht isoliert interpretiert werden, sondern nur in Zusammenhang mit weiteren Biosignalen sowie subjektiven und objektiven Größen (Lacey, 1967; Manzey, 1998). Messwertkorrekturen und die Aufzeichnung von Kontrollmaßen wie Atmung bzw. Körpertemperatur reduzieren zudem den Einfluss interindividueller Unterschiede sowie von Artefakten (Boucsein, 1992; Ribback, 2003). Dies wurde in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt.

Die **Erfassung der EDA in der Simulatoruntersuchung** erfolgte analog zu den obigen Erläuterungen an der Fußinnenseite mit Hilfe zweier nicht polarisierbaren Silber-/Silberchloridelektroden ( $\varnothing = 0,8$  cm). Da die Probanden während des Versuchs mit einem Automatikgetriebe fuhren, wurde hierfür der **linke Fuß** genutzt. In Anlehnung an Boucsein und Thum (1996) fanden zudem die Reinigung feuchter Hautstellen mit einer 70 %-Ethanollösung und die Füllung der Napfelektroden mit einer isotonischen Elektrodenpaste statt. Die Abtastrate während der Aufzeichnung betrug 32 Hz. Dies betraf sowohl die zwei Ruhe- als auch die Hauptmessungen während den Simulatorfahrten (vgl. Tabelle 25).

Als **Parameter der EDA** gingen sowohl das Hautleitfähigkeitsniveau als auch die Hautleitfähigkeitsreaktion in die Messung ein. Der Hauptfokus lag allerdings auf der Analyse der **SCR-Verläufe** (vgl. Abbildung 76, rechts), die nach einer Transition (**Zeitfenster**: 5 s vor und 12 s danach) entstanden sind. Hierfür wurde vorab eine händische Artefaktkorrektur der Biosignale der 80 Probanden vorgenommen. Dabei diente zum einen die zeitsynchrone Aufzeichnung der Körpertemperatur mittels Temperatursensor auf der linken Oberarmhaut als Kontrolle. Zum anderen ermöglichte die parallele Dokumentation der Atmung mittels Atemgurt auf Brusthöhe die Identifizierung von Atemartefakten. Für beide Kenngrößen lagen jeweils 32 Messungen pro Sekunde vor.

Neben diesen Signalkorrekturen fand zur Bestimmung der Reaktionsgrößen der SCRs mit Hilfe der Software MatLab die Festlegung eines **Amplitudenkriteriums von  $0,02 \mu\text{S}$**  statt. Außerdem erfolgte eine **Tiefpassfilterung** der Daten mit 0,5 Hz. Darüber hinaus wurden für die inferenzstatistische Analysen Differenzwerte zwischen Ruhe- und Verlaufsmessungen gebildet sowie spezifische Kenngrößen aus den Rohwerten berechnet. Jene basierten für das Hautleitfähigkeitsniveau und die Amplitude der Hautleitwertsreaktion auf dem **Range-Korrekturverfahren nach Lykken et al. (1966)**. Jenes minimiert die interpersonelle Streuung und berücksichtigt Minima bzw. Maxima der EDA (Schandry, 1998).

### **Kardiovaskuläre Aktivität**

Analog zur EDA gehört auch die kardiovaskuläre Aktivität zu den peripherphysiologischen Maßen des autonomen Nervensystems. Sie weist einen hohen Zusammenhang zu psychischen Prozessen wie Aktivierung, Emotion, Stress, Habituation und Aufmerksamkeit auf (Schandry, 1998). Die zugehörigen Indikatoren haben sich allerdings vorwiegend als Korrelate physischer sowie mentaler Beanspruchung erwiesen (Boucsein, 2006). Ein diesbezüglich häufig verwendeter Parameter ist die **Herzrate** (HR). Die Gründe hierfür liegen in der Artefaktunanfälligkeit (Ribback, 2003), in der hohen Reliabilität für Beanspruchungsmessungen (Oshima, 2001) sowie im geringen Aufwand für die Datenerhebung (Fahrenberg & Wientjes, 2000). Hinzu tritt die einfache Handhabung bei der Ableitung der HR mittels Elektrokardiogramm (EKG) oder fotoelektrischer Sensoren am Ohrläppchen. Im

ersten Fall wird typischerweise eine bipolare Extremitätenableitung nach Einthoven (Typ II) durchgeführt (Piechulla, 2002). Die Platzierung der Elektroden erfolgt hierbei am rechten und linken Arm sowie am linken Bein. Da diese Methode jedoch für Bewegungsartefakte anfällig ist, findet sich häufig eine Übertragung der Ableitungsorte auf die Brustwand der Versuchsperson. Die Elektroden der Arme werden demgemäß unter den beiden Schlüsselbeinen und die Elektrode des Beins als Referenz am Brustkorb unterhalb der Herzspitze angebracht. Aus dem auf jene Weise erhaltenen EKG wird in der Regel die Herzrate als **Herzschläge pro Minute** (beats per minute, BPM) angegeben. Dabei ist zu beachten, dass das EKG im Rhythmus der Atmung schwankt. So wird der Herzschlag beim Einatmen beschleunigt und beim Ausatmen verlangsamt (vgl. Respiratorische Sinusarrhythmie [RSA], Piechulla, 2002). Folglich eignet sich zur Artefaktkontrolle die parallele Aufzeichnung beider Kenngrößen. Diesbezüglich hat sich zudem gezeigt, dass die Dämpfung der RSA analog zur Herzrate mit der mentalen Belastung korreliert (Piechulla, 2002). So nimmt sie bei Entspannung, Orientierung sowie Aufmerksamkeitsprozessen ab und bei Schmerz- bzw. Angstreizen zu (Schandry, 1998). Sie trennt zwischen hohen versus niedrigen (Roscoe, 1992, Svensson & Wilson, 2002) und kurz- versus langfristigen Beanspruchungsphasen (Lindholm & Cheatham, 1983). Außerdem sind laut Lacey (1967) das Sinken der Herzrate mit der Aufnahme von Informationen aus der Umwelt und der Anstieg mit deren Verarbeitung verbunden (Kramer, 1993). Vergleichbare Forschungsergebnisse finden sich bei Ribback (2003) und Scerbo et al. (2001).

Ein weiteres Maß für die mentale Beanspruchung ist die **Herzratenvariabilität** (HRV) (Boucsein, 2006). Sie bezieht sich auf die Variabilität der Zeit, die zwischen einzelnen Herzschlägen (Interbeatintervall, IBI) vergeht. Bei steigender kognitiver Beanspruchung ist hierbei eine Abnahme zu verzeichnen, d.h. der Herzschlag wird regelmäßiger (Manzey, 1998). Dies lässt sich vor allem an der sogenannten 0,1-Hz-Komponente der HRV nachweisen (vgl. De Waard, 1996; Manzey, 1998; Richter et al., 1998). Jene lässt sich mit Hilfe von Spektralanalysen der IBI im mittleren Frequenzband (0,07 bis 0,14 Hz) abbilden und ist Folge der Mechanismen der Blutdruckregulation (Mulder, 1988).

Neben diesem Parameter, der teilweise wegen dem gleichzeitigen Einfluss sympathischer und parasympathischer Prozesse kritisiert wird (Ribback, 2003), existieren weitere **Streuungsmaße der HRV**. So empfiehlt Schandry (1998) die Berechnung der Varianz der IBI, wenn länger anhaltende und relativ stark ausgeprägte HR-Schwankungen vorliegen. Zudem bietet sich die Möglichkeit das **mittlere Quadrat sukzessiver Differenzen** (MQSD) zu bestimmen (vgl. Manzey, 1998). Jener Kennwert ist sensitiv für Unterschiede zwischen aufeinanderfolgenden IBI und berücksichtigt demnach schnelle Veränderungen stärker (Piechulla, 2002). Je höher der Wert ausfällt, desto entspannter bzw. erholter ist der Mensch

(Ribback, 2003). Ähnlich wie bei der Herzrate müssen bei der Auswertung der HRV jedoch Atemartefakte berücksichtigt werden. Insbesondere Sprechen führt hierbei zu einem Anstieg der HRV (Mulder & Mulder, 1987).

Die **Erfassung der kardiovaskulären Aktivität in der Simulatoruntersuchung** erfolgte mit Hilfe der Ableitung eines Elektrokardiogramms. Hierfür wurden analog zum erläuterten **Verfahren nach Eindhoven (Typ II)** drei Silber-/Silberchloridelektroden ( $\varnothing = 0,8$  cm) auf die Brust der Probanden aufgeklebt. Die Abtastrate der EKG-Aufzeichnung betrug 256 Hz. Dies betraf die Ruhe- und die Verlaufsmessungen während des Versuchs (vgl. Tabelle 25). Infolge der Artefaktanfälligkeit der Parameter diente wiederum die kontinuierliche Aufzeichnung der Veränderungen in der Atmung mittels Atemgurt sowie der Körpertemperatur mittels Temperatursensor als Kontrolle für die Datenauswertung. Jene fokussierte vorwiegend die Veränderungen der kardiovaskulären Parameter HR und HRV in Transitionssituationen (**Zeitfenster**: 5 s vor und 12 s danach).

Für die **Herzrate** wurden die Mittelwerte pro Minute (bpm, **beats per minute**) in Echtzeit bei der Aufzeichnung des EKG durch die Software Biotrace (Version 1.8) ermittelt. Herzraten kleiner als 40 und größer als 240 Schläge pro Minute wies das Programm dabei automatisch als Artefakte ab. Zur Minimierung interindividueller Ausgangswertunterschiede (Wilder, 1931) fand vor der inferenzstatistischen Analyse zudem die **Bildung von Differenzwerten** (HRdiff) zwischen dem Minutenmittelwert des Probanden im betrachteten Zeitfenster nach der Transition (12 s) und dem Minimum während der Messung davor (5 s) statt.

Bei der **Herzratenvariabilität** erfolgte hingegen die Betrachtung des **mittleren Quadrats sukzessiver Differenzen** (MQSD) und der 0,1-Hz-Komponente. Die erste Größe wurde dabei offline mit Hilfe der Biotrace Software berechnet. Für die Zweite diente eine Spektralanalyse mittels Fast Fourier Transformation als Grundlage. Hierbei bestimmte das Programm Biotrace die **0,1-Hz-Komponente als mittleres Frequenzband** (low frequency, LF) im Bereich von 0,04 bis 0,15 Hz und wertete den prozentualen Anteil an der Maximalvarianz aus (LF%). Das betrachtete Zeitfenster für die inferenzstatistische Analyse entsprach dem der HR.

Auf die Erhebung weiterer psychophysiologischer Beanspruchungsmaße aus der Hirnaktivität, dem Blutdruck, der Muskelaktivität oder aus okulomotorischen Indikatoren wird in der vorliegenden Arbeit verzichtet. Die Gründe hierfür liegen vorwiegend in der hohen Artefaktanfälligkeit der Parameter durch Bewegungen, in der teilweise sehr hohen interindividuellen Varianz und in den untersuchungsmethodischen Anforderungen (vgl. Manzey, 1998; Scerbo et al., 2001; Boucsein, 2006).

#### 6.4.4 Fragebogendaten

Die Datenbasis der zweiten Studie ergänzten Fragebögen, welche zu Untersuchungsbeginn die **Ausgangslage der Probanden** erfassten (vgl. Anhang). Hierbei wurden Daten über die Soziodemografie, die Fahrleistung, die Erfahrung mit FAS, das subjektive Befinden sowie über den Umgang mit Technik erhoben. Weiterhin stellte der Versuchsleiter direkt nach den Simulatorfahrten Fragen an die Testpersonen. Analog zum Kapitel 5.4.3 bezogen sich diese zum einen auf den erlebten **Systemmodus** und auf die **Transition** (vgl. Anhang). Zum anderen fand eine Einschätzung der subjektiven Beanspruchung auf der **Anstrengungsskala** nach Zijlstra und van Doorn (1985; dt. Version nach Eilers, Nachreiner & Hänecke, 1986) statt. Jene Beurteilung auf einer Skala von 0 bis 220 (vgl. Anhang) erfolgte sowohl nach der Trainingsfahrt als auch nach den vier Versuchsfahrten. Nach Ende dieser Messungen erhielten die Probanden zudem **Abschlussfragen**. Hierbei handelte es sich um die Bewertung des subjektiven Befindens sowie um die Einschätzung von Situationen, die potentiell zu Transitionen zwischen Fahrer und Automation führen könnten (vgl. Anhang). Bezüglich des letzten Falls ist anzumerken, dass dieser nicht Bestandteil der Auswertung in der vorliegenden Arbeit ist.

#### 6.4.5 Versuchsleiterprotokolle

Neben den benannten Daten wurden in der zweiten Studie gleichfalls Versuchsleiterprotokolle geführt. Sie dienten zur Dokumentation von Kommentaren der Probanden, Auffälligkeiten im Fahrerverhalten bzw. -zustand sowie potentiell fehlenden Messdaten (vgl. Anhang). Unter letzterem Gesichtspunkt ist anzumerken, dass insbesondere die biophysiologicalen Messungen zu unvollständigen Datensätzen geführt haben. Neben technischen Ausfällen des verwendeten Gerätesystems lag dies vor allem daran, dass einige Testpersonen keine Veränderungen der Hautleitfähigkeit zeigten (EDA-Non-Responder, Schandry, 1998) oder eine übermäßige Artefaktbildung bestand. Folglich variierten die Stichprobengrößen in den einzelnen Berechnungen geringfügig voneinander.

#### 6.4.6 Zusammenfassung

Die Abbildung 77 gibt einen zusammenfassenden Überblick über alle Daten, die zur Beantwortung der Fragestellungen der zweiten Studie dienten und erläutert wurden. Deren **inferenzstatistische Analyse** erfolgte mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS (Version 16.0). Vorausgehende Parameterbestimmungen fanden mit Matlab (vgl. Kapitel 6.4.2) oder mit Biotrace statt (vgl. Kapitel 6.4.3). Bei der statistischen Betrachtung gaben zunächst explorative Datenanalysen sowie Kolmogorov-Smirnov-Tests einen umfassenden Überblick über die Verteilung der Daten. Sie ermöglichten zudem den Ausschluss von eventuellen Ausreißern. Im Anschluss daran kamen entsprechend den Voraussetzungen parametrische

und nicht-parametrische Verfahren zur Anwendung ( $\alpha = .05$ ). Erstere umfassten je nach Anzahl der abhängigen Variablen univariate oder multivariate Varianzanalysen mit Messwiederholung. Mittels Levene-Test wurde die Varianzhomogenität im univariaten Fall geprüft. Im multivariaten Fall erfolgte die Testung der Homoskedastizität über den Box's-M Test. Bei den Analysen wurde zudem darauf geachtet, ob eine Verletzung der Sphärizitätsannahme vorlag ( $p < .05$ ). War dies über das Ergebnis des Mauchly-Tests gegeben, erfolgte eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser.

Da es bei der Datenauswertung ebenso zu Vergleichen innerhalb einer Stichprobe kam (z.B. beim Prä-Post-Fragebogen SOFI), diente gleichfalls der T-Test für verbundene Stichproben bzw. bei fehlender Normalverteilung ( $p < .05$ ) der Wilcoxon-Test zur statistischen Beurteilung der Daten. Weiterhin wurden Korrelationsanalysen zur Überprüfung der Zusammenhänge in den Daten mit Hilfe der Produkt-Moment-Korrelation (Pearson-Korrelation) bestimmt sowie die Stärke nach Bühl und Zofel (2005) interpretiert. Lag ein Trend in den Daten vor, wird dieser immer ab einem Signifikanzniveau von  $p < .10$  berichtet. Abschließend sei darauf hingewiesen, dass für die Kategorienunterteilungsskala nach Heller (1985) die Annahme eines Intervallskalenniveaus bestand (Wirtz & Nachtigall, 2006).

Objektive Maße	Subjektive Maße
<p><b>(1) Videodaten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Blickverhalten auf Systemzustandsanzeige bei Transitionen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anzahl und Nummer der Blicke</li> <li>- Blickdauer (gesamt, einzeln)</li> </ul> </li> <li>• <b>Fahrerverhalten bei Transitionen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Art und Weise der Reaktion</li> </ul> </li> </ul> <p><b>(2) Fahrdaten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Fahrerverhalten bei Transitionen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aktivierungsdauer (Zeitdauer vom Systemangebot bis zur Bestätigung dessen durch den Fahrer mittels Lenkradtaste)</li> <li>- Übernahmedauer (Zeitdauer von Übernahmeaufforderung bis zur 1. Fahrerreaktion in Fahrzeuglängs- bzw. Querrichtung)</li> <li>- Art und Stärke der Reaktion (lateral, longitudinal)</li> </ul> </li> </ul> <p><b>(3) Biophysiologicalische Daten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Elektrodermale Aktivität</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hautleitfähigkeitsreaktion (Amplitude, Latenzzeit, Anstiegszeit, Gipfelzeit, Erholungszeit)</li> </ul> </li> <li>• <b>Kardiovaskuläre Aktivität</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Herzrate (HR<sub>MW</sub>, HR<sub>diff</sub>)</li> <li>- Herzratenvariabilität (MQSD, LF%)</li> </ul> </li> <li>• <b>Atmung und Körpertemperatur</b></li> </ul>	<p><b>(1) Fragebögen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Fragen zur Ausgangslage</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Soziodemografie</li> <li>- Fahrleistung</li> <li>- Erfahrung mit FAS</li> <li>- Subjektives Befinden</li> <li>- Kontrollbedürfnis</li> <li>- Umgang mit Technik</li> </ul> </li> <li>• <b>Fragen nach jeder Fahrt</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bewertung der Transition</li> <li>- Bewertung des Systemmodus</li> <li>- Einschätzung Beanspruchung</li> </ul> </li> <li>• <b>Fragen nach dem Versuch</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Subjektives Befinden</li> <li>- Einschätzung potentieller Transitionssituationen</li> </ul> </li> </ul> <p><b>(2) Versuchsleiterprotokoll</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Kommentare, Auffälligkeiten, Messdaten</b></li> </ul>

Abbildung 77: Überblick über die ausgewerteten Daten der zweiten Studie



## 6.5 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie differenziert analog zum Kapitel 5.5 zwischen der **Richtung der Transition**. Je nachdem, ob es sich um eine Aktivierung oder Deaktivierung von Fahrfunktionen handelt, gliedert sich die Struktur daher in die zwei folgenden Ergebnisblöcke:

- **1. Ergebnisblock:** Transitionen in Richtung Automation
- **2. Ergebnisblock:** Transitionen in Richtung Fahrer

Zum **ersten Ergebnisblock** gehören alle Resultate, die einen Wechsel vom Modus „Fahrer selbst“ in Richtung Automation betreffen (vgl. Abbildung 61). Die Ergebnisdarstellung im Kapitel 6.5.1 trennt dabei zwischen den betrachteten Transitionsmerkmalen „Grad der Kontrollverschiebung“, „Indirekte Transition“ sowie „Ähnlichkeit von Systemmodi“ und greift die damit verbundenen Fragestellungen auf (vgl. Kapitel 6.2). Die folgende Abbildung 78 gibt demgemäß nochmals einen Überblick über die Übergänge je Transitionsmerkmal. Die inferenzstatistischen Analysen beziehen sich beim „Grad der Kontrollverschiebung“ auf den Vergleich der unterschiedlichen Weiten an Kontrollangaben. Bei den betrachteten Übergangssituationen für die Merkmale „Indirekte Transition“ und „Ähnlichkeit von Systemmodi“ (vgl. Abbildung 78) wird als Referenz der Übergang aus „Fahrer selbst“ in den jeweiligen Systemmodus hinzugezogen (vgl. Kapitel 6.5.1).

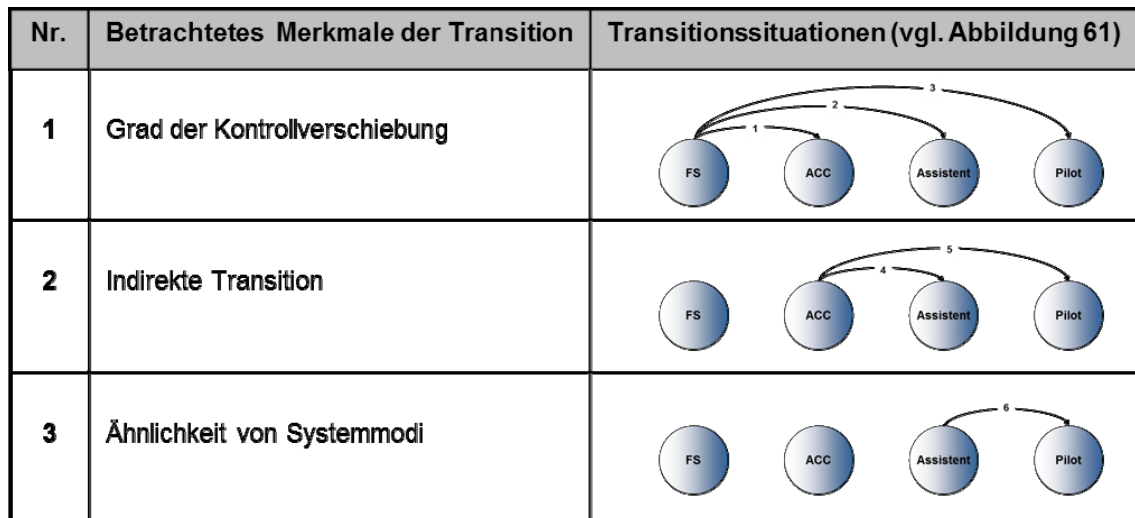


Abbildung 78: Transitionen des ersten Ergebnisblocks in Richtung Automation

Der **zweite Ergebnisblock** besteht aus allen Befunden, die mit Übernahmeaufforderungen in Richtung Fahrer verbunden waren (vgl. Abbildung 61). Jene beinhalteten sowohl einen unterschiedlichen „Grad der Kontrollverschiebung“ als auch „indirekte Transitionen“ auf die

Zwischenstufe „ACC“. Zudem fanden gleichfalls Übergänge vom Modus „Pilot“ auf das funktional ähnliche System „Assistent“ statt. Eine Zusammenfassung gibt Abbildung 79. Die inferenzstatistischen Vergleiche entsprechen denjenigen, die für die Transitionen in Richtung Automation bereits beschrieben wurden. Sie beziehen sich nur auf die entgegengesetzte Richtung des Übergangs (vgl. Kapitel 6.5.2).

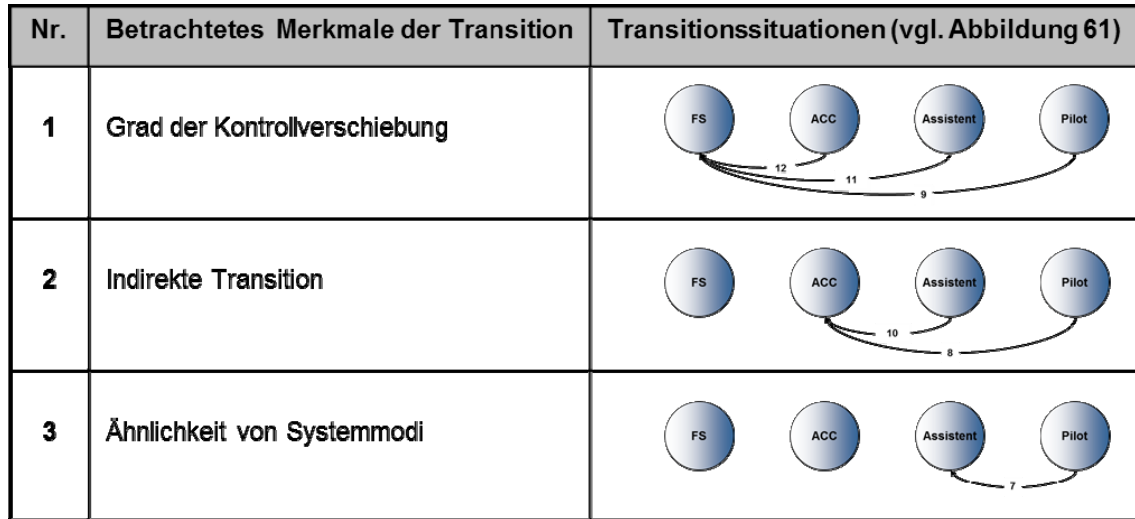


Abbildung 79: Transitionen des zweiten Ergebnisblocks in Richtung Fahrer

In dem Zusammenhang ist nochmals darauf hinzuweisen, dass in der Arbeit zusätzlich versucht wurde, über erweiterte Transitionen Erkenntnisse für eine optimierte Gestaltung von Übernahmeaufforderungen zu erhalten (vgl. Kapitel 6.3.4, Abbildung 68). Zehn Probanden erlebten hierfür sowohl bei der Transition auf „ACC“ als auch auf „Assistent“ erst eine vollständige Kontrollrückgabe und konnten danach den jeweiligen Modus aus „FS“ aktivieren. Die Frage ist, ob diese bewusste Einschaltung des Modus das Verständnis für den Übergang verbessert und die negativen Effekte aus der ersten Studie (z.B. Auftreten von Mode Confusion) mindert.

### 6.5.1 Erster Ergebnisblock: Transitionen in Richtung Automation

Für diesen Ergebnisteil wurden insgesamt 120 Übergabesituationen in Richtung Automation analysiert. Jene resultieren aus der Anzahl der Versuchspersonen, welche je nach Modusgruppe die in Abbildung 78 dargestellten Transitionen erlebt haben. Die Auswertung erstreckt sich von der Aktivierungsdauer über die subjektiven Daten und setzt sich anschließend mit der Prüfung der biophysiologicalen Maße sowie des Blickverhaltens fort. Die Ergebnisdarstellung differenziert nach den betrachteten Merkmalen von Transitionen (vgl. Kapitel 6.2).

### Grad der Kontrollverschiebung

Bei der Analyse des „Grads der Kontrollverschiebung“ ging es um die Beantwortung der Frage, ob die Aktivierung des Systemmodus „Assistent“ aufgrund der höheren Anforderungen an die Differenzierungsfähigkeit des Fahrers zu stärkeren Effekten in den erhobenen Verhaltens- und Bewertungsparametern führt als Übergänge in „Pilot“ oder „ACC“ (vgl. Tabelle 21). Demgemäß wurden die Daten der Modusgruppe „Fahrer selbst“ ( $N = 20$ ) inferenzstatistisch näher betrachtet. In die Varianzanalyse mit Messwiederholung gingen neben dem „Grad der Kontrollverschiebung“ („Endmodus“ nach Abbildung 71) gleichfalls die Versuchsfahrten als Innersubjektfaktoren in die Berechnung ein. Hintergrund dessen war die Prüfung von Reihenfolgeeffekten, welche bei der Interpretation der Ergebnisse betrachtet werden müssten. Da für die Fahrten ein linearer Zusammenhang angenommen wurde, erfolgte dahingehend die Berechnung von Kontrasten über die polynomiale Methode.

Die Abbildung 80 stellt zunächst die Ergebnisse aus den Analysen der Fahr- und Fragebogendaten über alle Fahrten gemittelt dar. Jene beziehen sich auf die **Aktivierungsdauer** (vgl. Abbildung 80, links, oben) als Maß für die Zeit, welche die Probanden für die Bestätigung des Systemangebots mittels Lenkradtaste benötigten (vgl. Tabelle 28). Für den Übergang von „FS“ auf „Assistent“ wurde dabei angenommen, dass sich die Komplexität des „Grads der Kontrollverschiebung“ in verlängerten Reaktionszeiten widerspiegelt.

Zudem stellt die Abbildung 80 die **subjektiven Bewertungen** der Schnelligkeit der Reaktion (Abbildung 80, rechts, oben), der Verständlichkeit des Systemvorschlags (Abbildung 80, links, unten) und der Nachvollziehbarkeit der Transition (Abbildung 80, rechts, unten) dar. Analog zur Aktivierungsdauer sollten sich diejenigen Übergänge, welche für den Nutzer schwer zu verstehen sind und als nicht transparent wahrgenommen werden, in diesen subjektiven Angaben niederschlagen.

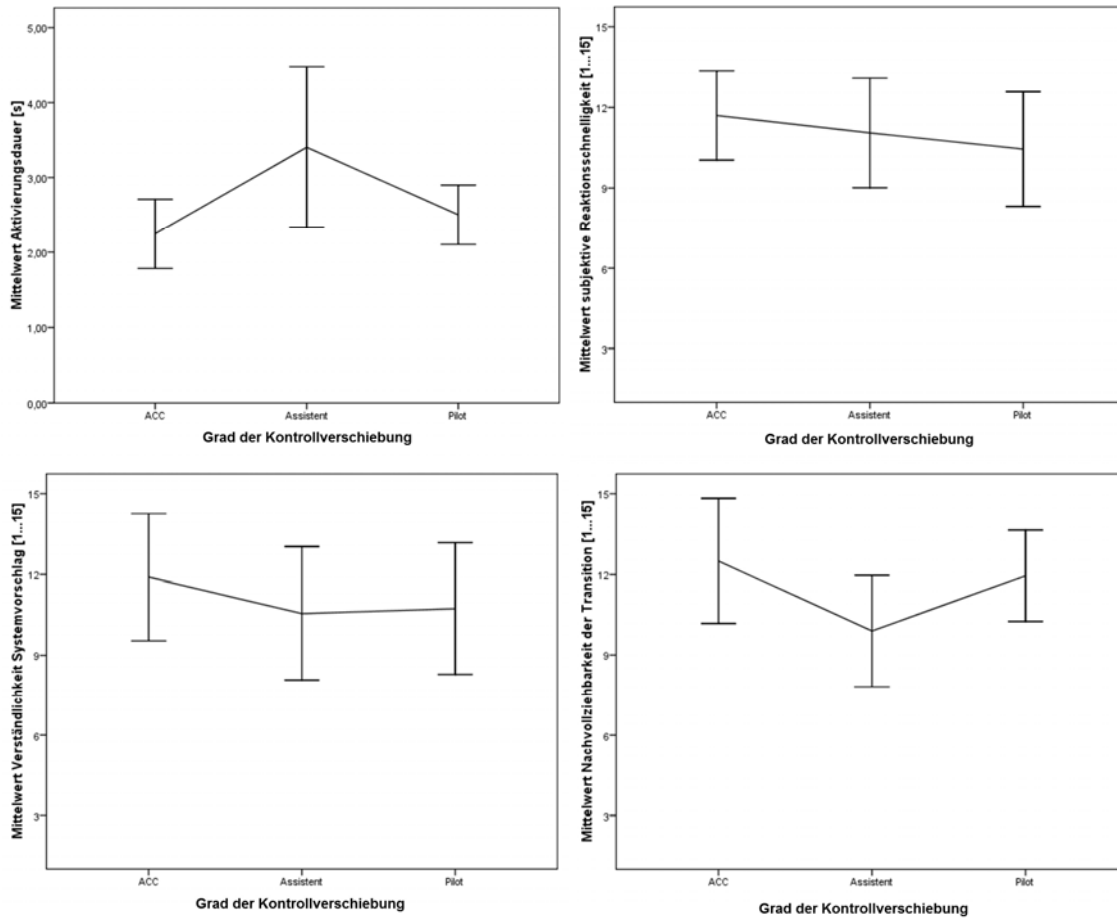


Abbildung 80: Mittlere ( $M$ ,  $SD$ ) Aktivierungsdauer (links, oben), subjektive Reaktionsgeschwindigkeit (rechts, oben), Verständlichkeit des Systemvorschlags (links, unten) und Nachvollziehbarkeit der Transition (rechts, unten) für Kontrollverschiebungen aus „FS“ in „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“

Die inferenzstatistische Auswertung des Messwiederholungsfaktors „Versuchsfahrt“ erbrachte für die Aktivierungsdauer ( $F[2, 10] = 1.65$ ,  $p = .240$ ;  $\eta^2 = .248$ ), die subjektive Bewertung der Reaktionsschnelligkeit ( $F[2, 8] = 0.97$ ,  $p = .418$ ;  $\eta^2 = .196$ ), die Verständlichkeit des Systemvorschlags ( $F[2, 8] = 0.40$ ,  $p = .682$ ;  $\eta^2 = .019$ ) und die Nachvollziehbarkeit der Transition ( $F[2, 8] = 0.16$ ,  $p = .857$ ;  $\eta^2 = .038$ ) keine signifikanten Ergebnisse. Daher konnte die Analyse des „Grads der Kontrollverschiebung“ ohne die Berücksichtigung von Gewöhnungseffekten erfolgen. Diesbezüglich ergaben sich Signifikanzen für die Aktivierungsdauer ( $F[2, 10] = 13.07$ ,  $p = .002$ ;  $\eta^2 = .963$ ) und die Nachvollziehbarkeit der Transition ( $F[2, 8] = 103.34$ ,  $p < .000$ ;  $\eta^2 = .723$ ). Über alle Versuchsfahrten gemittelt, aktivierten die Probanden dabei den Modus „ACC“ 1.20 s ( $p = .032$ ) und den Modus „Pilot“ um 0.96 s ( $p = .049$ ) schneller als den Modus „Assistent“ ( $M = 3.47$ ;  $SD = 1.07$ ). Hypothesenkonform konnten folglich bei letzterem Übergang verzögerte Reaktionen bei der Aktivierung dokumentiert werden. Zudem haben die Testpersonen bei der Kontrollverschiebung auf „ACC“ ( $M = 12.50$ ;  $SD = 2.33$ ) im Vergleich zur Transition auf „Pilot“ ( $M = 11.95$ ;  $SD = 1.70$ ;

$p = .026$ ) und „Assistent“ ( $M = 9.98$ ;  $SD = 2.08$   $p < .001$ ) besser verstanden, welche Aufgaben der Fahrzeugführung sie nach dem Übergang beibehalten. Gleiches galt für den paarweisen Vergleich der Kontrollverschiebung auf „Pilot“ versus „Assistent“ ( $p = .026$ ). Die Schwierigkeit des Nachvollziehens, welche Teilfunktionen der Fahrzeugkontrolle beim Fahrer und welche beim System liegen, spiegelt sich daher hypothesenkonform in dieser subjektiven Angabe wider. Die wahrgenommene Schnelligkeit der Reaktion ( $F[2, 8] = 2.64$ ,  $p = .131$ ;  $\eta^2 = .398$ ) sowie die Verständlichkeit des Systemvorschlags ( $F[2, 8] = 1.23$ ,  $p = .341$ ;  $\eta^2 = .236$ ) unterschieden sich dagegen nicht (vgl. Abbildung 80).

Interessant ist in dem Zusammenhang, dass zehn von 18 Teilnehmern der Modusgruppe „FS“ zusätzlich auf Nachfrage angaben, sich bei der Transition auf „Assistent“ eher ein schrittweises Hochschalten über die Zwischenstufe „ACC“ zu wünschen. Bei der Aktivierung des Systems „Pilot“ sprachen sich hingegen nur sieben Probanden für einen derartigen Übergang aus. Analog zur ersten Studie (vgl. Kapitel 5.5.1) zeichnet sich anscheinend auch in dieser Untersuchung eine Wahrnehmung des Modus „Pilot“ als „On-Off-System“ ab. Jene bewirkt, dass ein direktes Einschalten der Funktion besser verstanden wird. Im Gegensatz dazu möchten die Fahrer Systeme, in denen sie noch Anteile an der Fahraufgabe haben nicht vollständig aktivieren. Hier erzielen Zwischenstufen der Automation eher einen positiven Effekt auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. Die Aussage ist bei der Prüfung der Wechselwirkung zwischen dem Transitionsmerkmal „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Indirekte Transition“ nochmals aufzugreifen.

Gemäß den Annahmen (vgl. Kapitel 6.2), sollte sich das unterschiedliche Beanspruchungserleben bei den Transitionen auch in **biophysiologicalen Größen** zeigen. Dabei galt es zu prüfen, ob schwer nachvollziehbare oder unerwartete Übergänge zu einer Orientierungsreaktion führen (vgl. Kapitel 6.4.3). Diese würde für einen höheren kognitiven bzw. emotionalen Aufwand sprechen. Jener sollte sich einerseits im „Grad der Kontrollverschiebung“ zeigen. Andererseits ist zu erwarten, dass dahingehende Effekte bei der ersten erlebten Transition in einen höheren Automatisierungsgrad auftreten und im Verlauf der Fahrten abschwächen.

Betrachtet man zunächst die im Kapitel 6.4.3 ausgewählten Indikatoren der **kardiovaskulären Aktivität**, ergeben sich die Werte der Tabelle 29. Dabei ist zu beachten, dass für die Berechnung einzelner Werte ein Zeitfenster von fünf Sekunden vor und 12 Sekunden nach der Transition einbezogen wurde.

Tabelle 29: Ergebnis der Varianzanalyse zur kardiovaskulären Aktivität bei Übergang

Quelle	Kenngroßen	df, Fehler df	F	Signifikanz	Eta <sup>2</sup>
Versuchsfahrt	Herzrate (HR <sub>Diff</sub> )*	2, 8	0.47	.638	.106
	<b>Herzrate (HR<sub>M</sub>)**</b>	2, 8	10.85	<b>.005</b>	<b>.731</b>
	MQSD***	2, 8	0.08	.921	.020
	HRV****	2, 8	0.02	.908	.005
Grad der Kontrollverschiebung	Herzrate (HR <sub>Diff</sub> )	2, 8	1.17	.338	.226
	Herzrate (HR <sub>M</sub> )	2, 8	0.98	.417	.196
	MQSD	2, 8	2.03	.193	.337
	HRV	2, 8	0.80	.483	.166
Versuchsfahrt x Grad der Kontrollverschiebung	Herzrate (HR <sub>Diff</sub> )	4, 16	0.36	.680	.083
	<b>Herzrate (HR<sub>M</sub>)</b>	4, 16	5.06	<b>.031</b>	<b>.559</b>
	MQSD	4, 16	1.58	.271	.283
	HRV	4, 16	3.06	.164	.558

\*HR<sub>Diff</sub> = Differenz des Minutenmittelwerts im Zeitfenster nach der Transition mit dem Minimum davor

\*\*HR<sub>M</sub> = beat per minute (berechnet mit Hilfe der Auswertungssoftware)

\*\*\*MQSD = Mittleres Quadrat der sukzessiven Differenzen (berechnet mit Hilfe der Auswertungssoftware)

\*\*\*\*HRV = Herzratenvariabilität (berechnet als prozentualer Anteil an der Maximalvarianz im mittleren Frequenzband)

Laut Tabelle 29 ergab sich für den „Grad der Kontrollverschiebung“ kein signifikanter Haupteffekt. Es zeigte sich jedoch eine Wechselwirkung zur jeweiligen Versuchsfahrt bei der mittleren Herzrate, die durch einen Haupteffekt der Fahrt selbst begleitet wurde. Detailanalysen mit Hilfe paarweiser Vergleiche konnten demgemäß aufschlüsseln, dass die Transition auf den Modus „ACC“ mit einer Abnahme der Herzrate über die Fahrten hinweg verbunden war ( $F[2, 17] = 6.88$ ,  $p = .006$ ;  $\eta^2 = .447$ ). Die Abbildung 81 (links, oben) stellt diesbezüglich den Zusammenhang grafisch im Vergleich zu den anderen Modi (rechts, oben und links, unten) dar. Extrahiert man zudem nur die zweite Fahrt, in der die Testpersonen das erste Mal einen anderen Automatisierungsgrad einschalteten (vgl. Abbildung 81, rechts, unten), so ergab sich ein Unterschied für den Übergang „FS-ACC“ und „FS-Pilot“ ( $F[2, 17] = 3.76$ ,  $p = .045$ ;  $\eta^2 = .346$ ). Der höhere Grad der Kontrollverschiebung ging dabei mit einer geringeren Herzrate einher ( $M_{ACC} = 77.98$ ,  $SD_{ACC} = 9.56$  vs.  $M_{Pilot} = 66.88$ ,  $SD_{Pilot} = 7.11$ ).

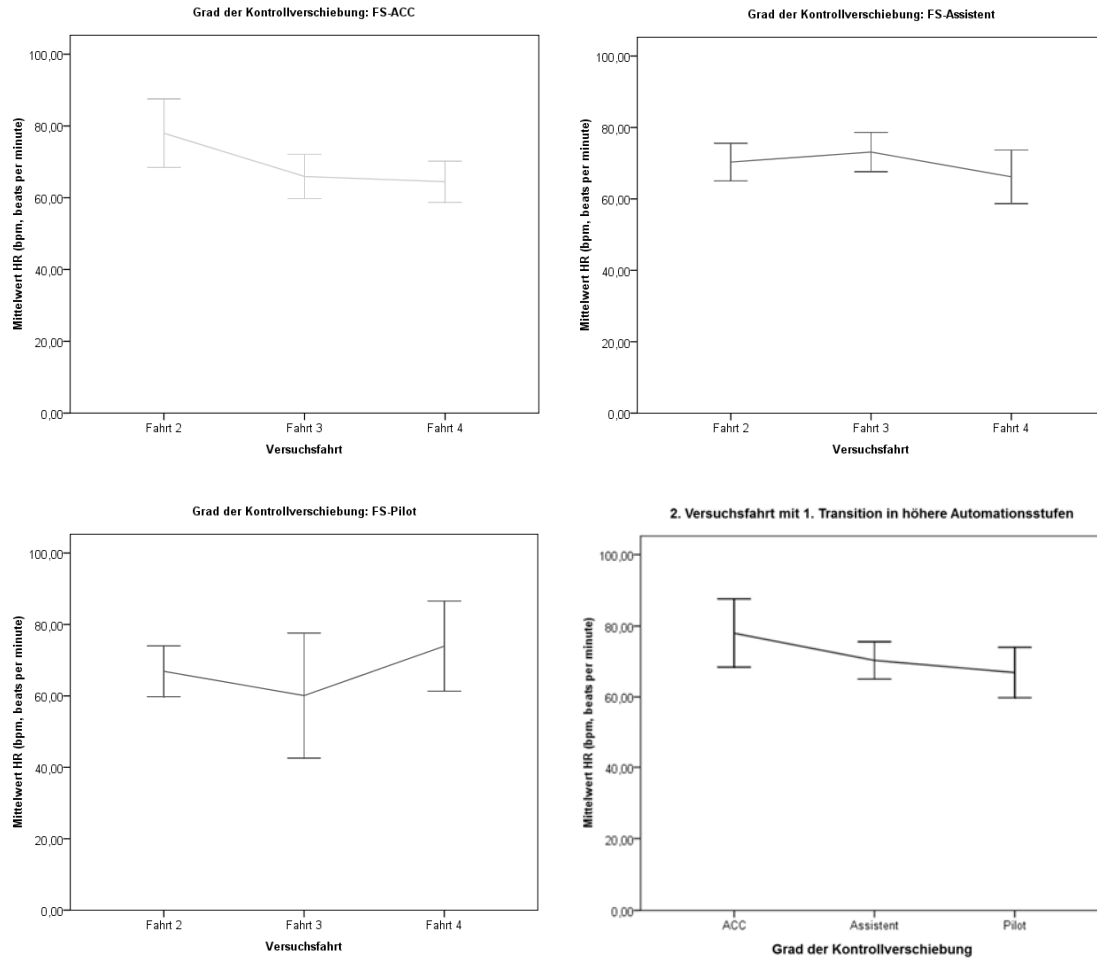


Abbildung 81: Mittlere Herzrate ( $M$ ,  $SD$ ) für die Kontrollverschiebung auf „ACC“ (links, oben), „Assistent“ (rechts, oben) und „Pilot“ (links, unten) sowie für alle Grade der Kontrollverschiebung in der zweiten Versuchsfahrt mit erstmaligen Erleben eines höheren Automationsgrades (rechts, unten)

Bei der Interpretation der erhaltenen Unterschiede ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Differenz der Herzrate, MQSD und die Herzratenvariabilität nicht signifikant wurden (vgl. Tabelle 29). Da insbesondere die Differenz der Herzrate sowie die HRV ein plötzliches Absinken der kardiovaskulären Aktivität widerspiegeln und somit stärker eine Orientierungsreaktion im Sinne von Sokolov (1960) repräsentieren (vgl. Kapitel 6.4.3), ist anzunehmen, dass die versuchsfahrtabhängigen Unterschiede weniger eine Beanspruchung infolge der Transition verdeutlichen. Insbesondere beim Übergang auf „ACC“ im Verlauf der Fahrten (vgl. Abbildung 81, links, oben) kann eher von einem Gewöhnungseffekt ausgegangen werden. Daher scheinen die betrachteten Kenngrößen der kardiovaskulären Aktivität weniger sensitiv bzw. geeignet für die Beantwortung der Fragestellungen der Arbeit zu sein (vgl. Kapitel 6.2). Sie spiegeln demnach weniger gut Transitionen wider, die für den Fahrer schwer nachvollziehbar sind bzw. in der erlebten Art und Weise nicht erwartet wurden.

Betrachtet man analog dazu die varianzanalytische Auswertung der **elektrodermalen Aktivität** ergaben sich ausschließlich für zwei der extrahierten Parameter der Hautleitfähigkeitsreaktion (vgl. Kapitel 6.4.3.) signifikante Haupt- und Wechselwirkungseffekte. Diese betrafen gemäß Tabelle 30 sowohl die Amplitudengröße (Höhe der Reaktion) als auch die Erholungszeit (halbe Anstiegszeit der Reaktion, vgl. Abbildung 76).

Tabelle 30: Signifikante Ergebnisse der Analyse der Hautleitfähigkeitsreaktion\*

Quelle	Kenngrößen	df, Fehler df	F	Signifikanz	Eta <sup>2</sup>
Versuchsfahrt	Erholungszeit	2, 8	5.94	.026	.597
Grad der Kontrollverschiebung	Amplitudengröße	2, 8	3.90	.066	.494
	Erholungszeit	2, 8	10.30	.006	.720
Versuchsfahrt x Grad der Kontrollverschiebung	Amplitudengröße	4, 16	5.56	.005	.581
	Erholungszeit	4, 16	4.16	.017	.510

\* Die Berechnung der Werte erfolgte für ein Zeitfenster von fünf Sekunden vor und 12 Sekunden nach der Transition.

Unter Berücksichtigung der Interaktion konnten Detailanalysen mit Hilfe paarweiser Vergleiche nachweisen, dass nur bei der zweiten Versuchsfahrt mit erstem Erleben eines höheren Automatisierungsgrades signifikante Unterschiede in der Erholungszeit und der Amplitude bestanden. Wie in Abbildung 82 verdeutlicht, wiesen die Probanden mit Übergang auf den Modus „Pilot“ im Vergleich zu den anderen Kontrollverschiebungen geringere Amplituden in der Hautleitfähigkeitsreaktion ( $F[2, 17] = 4.56, p = .026; \eta^2 = .349$ ) mit kürzerer Erholungszeit ( $F[2, 17] = 9.66, p = .002; \eta^2 = .532$ ) auf. Die Reaktionsmuster „Zunahme der Amplitudengröße“ und „Verlängerung der Erholungszeiten“ scheinen demnach gemäß Boucsein (1992) auf eine veränderte Informationsverarbeitung hinzudeuten und eine Art Orientierungsreaktion widerzuspiegeln. Dies könnte wiederum als eine verstärkte Aktivität des Effort-Systems bei der Aktivierung der Systeme „ACC“ und „Assistent“ in der zweiten Versuchsfahrt interpretiert werden. In dem Sinne deckt sich das Ergebnis mit den Erkenntnissen aus der Auswertung der Fahr- und Fragebogendaten. Die Amplitudengröße und die Erholungszeit der Hautleitfähigkeitsreaktion scheinen demnach sensitiv bzw. geeignet für die Beantwortung der Fragestellungen der Arbeit zu sein (vgl. Kapitel 6.2). Der kognitive Aufwand in der Differenzierung derjenigen Aufgaben, die der Fahrer bei der Fahraufgabe nach der Transition noch übernehmen muss, wird in diesen Kennwerten abgebildet.

Für die restlichen Indikatoren der elektrodermalen Aktivität (vgl. Abbildung 77) konnten keine derartigen Effekte gefunden werden (vgl. Anhang).



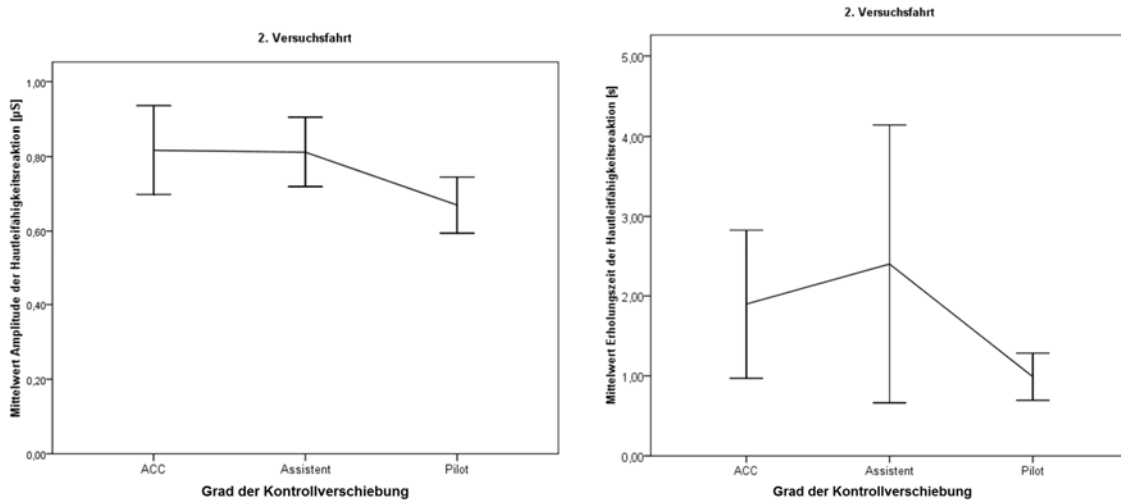


Abbildung 82: Amplitude ( $M$ ,  $SD$ ; links) und Erholungszeit ( $M$ ,  $SD$ ; rechts) der Hautleitfähigkeitsreaktion für die Kontrollverschiebungen in der zweiten Versuchsfahrt

Die ergänzende Analyse des **Blickverhaltens** auf die Systemzustandsanzeige nach Angebot der Funktion untermauerte die bisherigen Erkenntnisse weiter. So zeigte sich beim ersten Blick auf das Display ein signifikantes Ergebnis bezüglich des „Grads der Kontrollverschiebung“ ( $F[2, 14] = 4.69$ ,  $p = .028$ ;  $\eta^2 = .401$ ). Die Probanden mit Übergang auf den Modus „Assistent“ schauten im Mittel länger ( $M = 2.13$ ,  $SD = 0.47$ ) auf die Anzeige als diejenigen, welche das „ACC“ ( $M = 1.47$ ,  $SD = 0.48$ ) oder den „Piloten“ ( $M = 1.50$ ,  $SD = 0.46$ ) aktivierten. Dies war beim zweiten und gleichzeitig letzten Blick nicht mehr der Fall ( $F[2, 14] = 1.42$ ,  $p = .275$ ;  $\eta^2 = .168$ ). Zudem ließ sich für die Auswertung der Einzelblicke kein weiterer Effekt der Fahrt oder eine Wechselwirkung feststellen (vgl. Anhang). Allerdings zeigte sich bei der Betrachtung der Gesamtblickdauer, dass die Probanden mit Übergang auf „Pilot“ und „ACC“ im Mittel 0.5 s kürzer auf das Display schauten als die Personen, welche die Kontrolle an den „Assistenten“ abgaben ( $F[2, 42] = 6.27$ ,  $p = .004$ ;  $\eta^2 = .230$ ). Die Einschaltung des Modus „Assistent“ führte folglich zu einem verzögerten Blickverhalten. Dies entspricht wiederum der Annahme in Tabelle 21.

In dem Zusammenhang konnte bei der weiteren Analyse der **Videodaten** bei vier Versuchsteilnehmern (VP 6, 33, 47, 72) ein auffälliges Verhalten in der Aktivierungsphase des Modus „Assistent“ dokumentiert werden. So nahmen hier zwei der Probanden (VP 47, 72) die Hände vom Lenkrad. Da ein derartiges Verhalten nur beim System „Pilot“ impliziert war, ging mit jener **Modusverwechslung** ein regelungsbedingtes „Pendeln“ in der Fahrspur einher. Dieses ist in Abbildung 83 anhand des Verlaufs der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen auf das Systemangebot „Assistent aktivieren?“ zum Zeitpunkt Null grafisch dargestellt. Die visualisierten Größen beziehen sich dabei auf die Fahrgeschwindigkeit (km/h), den Lenkradwinkel (°), die Lenkradwinkelgeschwindigkeit (°/s) und die Querabweichung (m) des Egofahrzeugs.

Zudem werden die Verläufe aller Testpersonen mit auffälliger Reaktion bei der Systemaktivierung den Durchschnittswerten der übrigen Probanden ( $N = 16$ ) gegenübergestellt.

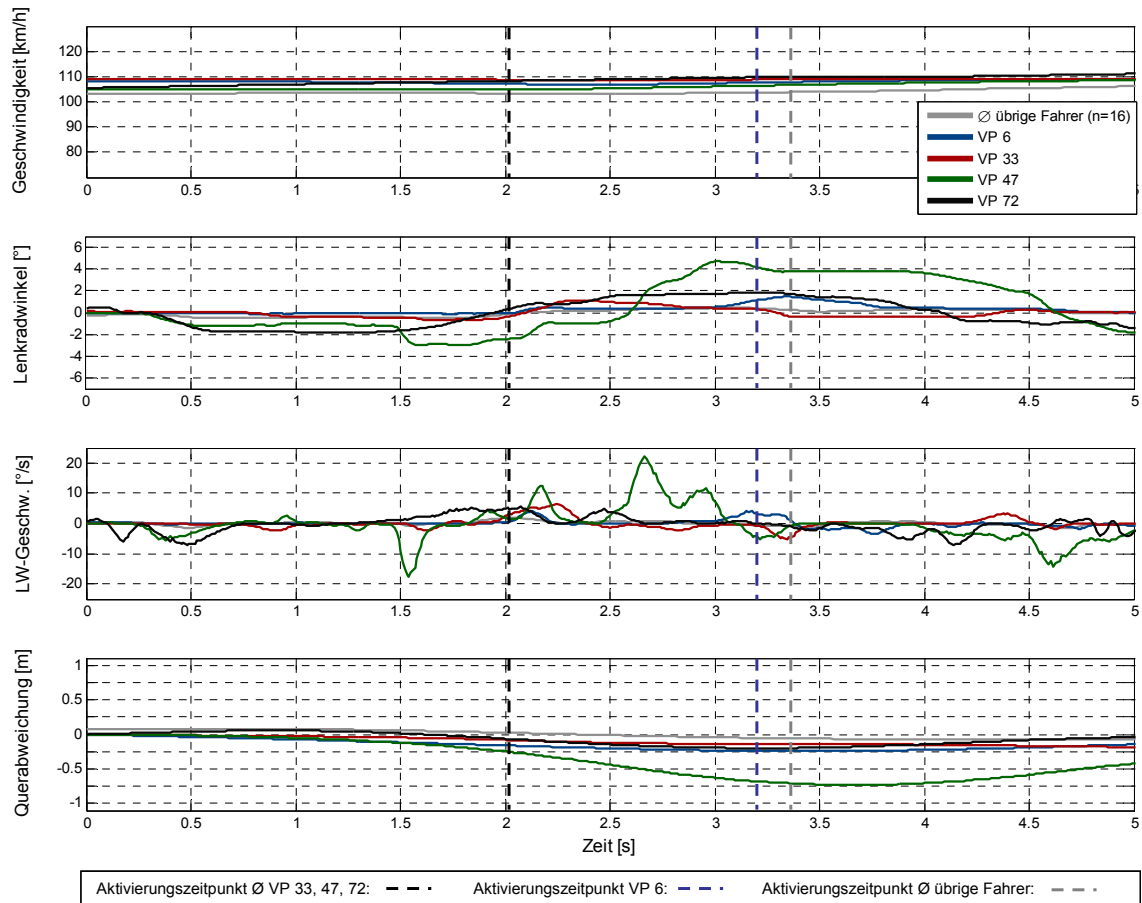


Abbildung 83: Verlauf der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen für die Kontrollverschiebung „FS-Assistent“ (Zeitpunkt 0 = Systemangebot) über alle Fahrten

Mit Bezug zur Abbildung 83 ist zu ergänzen, dass die Versuchsteilnehmer mit der Nummer 33 bzw. 6 zwar keine „Hands-off-Fahrt“ zeigten, jedoch nach der Aktivierung mehrmals auf die Systemzustandsanzeige blickten (min = 3 Blicke, max = 4 Blicke von maximal 1,41 s Dauer). Außerdem gaben sie nach der Versuchsfahrt an, sich unsicher über den eingeschalteten Modus gewesen zu sein (Vermerk im Versuchsleiterprotokoll). Daher deutet das gezeigte Suchverhalten auf einen für die Fahrer weniger gut nachvollziehbaren Übergang mit hoher Wahrscheinlichkeit für Automation Surprises hin. Unter Berücksichtigung der dokumentierten Modusverwechslungen bei Proband 72 und 47, wirkt sich hierbei die gleichzeitige Verfügbarkeit von einander sehr ähnlichen Systemmodi negativ auf das Verhalten aus. Darüber hinaus ist interessant, dass die Aktivierungsdauern der Testpersonen 33, 47 und 72 deutlich kürzer ( $M = 2,05$ ) als die durchschnittliche Bestätigungszeit der übrigen Probanden ausfielen ( $M = 3,48$ ). Die Informationen wurde hier anscheinend nicht adäquat

aufgenommen, sondern eher ein erwartungsbasiertes Verhalten mit Aktivierung eines mental postulierten Modus gezeigt.

Um abschließend ein globales Bild über die Zusammenhänge zwischen den betrachteten Variablen zu erhalten, wurden **Korrelationsanalysen** gerechnet. Diese zeigten anhand des Korrelationskoeffizienten nach Pearson teils gering ( $r < 0,50$ ), teils mittlere ( $r < 0,70$ ) bis hohe ( $r < 0,90$ ) Zusammenhänge (Cohen, 1988). So ergab sich bezüglich der Aktivierungsdauer eine gering ausgeprägte, negative Korrelation zur wahrgenommenen Nachvollziehbarkeit der Transition ( $r[58] = -0.40$ ,  $p = .002$ ). Gleichzeitig hing die Dauer der Blicke auf das Display positiv mit dem Parameter zusammen ( $r[46]_{1. \text{Blick}} = 0.34$ ,  $p = .002$ ;  $r[45]_{2. \text{Blick}} = 0.43$ ,  $p = .003$ ;  $r[23]_{\text{Blick\_gesamt}} = 0.48$ ,  $p = .019$ ). Die bewertete Nachvollziehbarkeit der Transition korrelierte hingegen signifikant negativ mit der Dauer des ersten Blickes auf die Systemzustandsanzeige ( $r[45] = -0.38$ ,  $p = .023$ ) und der Gesamtblickdauer ( $r[22] = -0.44$ ,  $p = .041$ ). Dafür zeigten sich positive Zusammenhänge zur subjektiv beurteilten Verständlichkeit des Systemvorschlags ( $r[57] = 0.49$ ,  $p < .000$ ).

Bezüglich der biophysiologicalen Kennwerte wurden gemäß der Interpretierbarkeit der dargestellten Ergebnisse für die Fragestellungen der Arbeit nur die elektrodermalen Größen betrachtet (Ausschluss kardiovaskuläre Parameter). In die Berechnungen gingen zudem nur die Amplitudengröße und die Erholungszeit der Hautleitfähigkeitsreaktion ein, da diese in den inferenzstatistischen Analysen signifikante Werte ergaben. Hierbei zeigte sich ausschließlich für die Erholungszeit eine signifikante Korrelation zur Dauer des ersten Blickes auf die Systemzustandsanzeige ( $r[46] = 0.30$ ,  $p = .041$ ) und zur Gesamtblickdauer ( $r[23] = 0.46$ ,  $p = .029$ ).

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse zur Auswirkung der Transitionsmerkmale „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Indirekte Transition“ auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion eingegangen. Im Vordergrund steht dabei die Wechselwirkung der beiden Faktoren (vgl. Kapitel 6.2; Tabelle 21).

### **Grad der Kontrollverschiebung \* Indirekte Transition**

Zur Beantwortung der Frage, ob sich indirekte Transitionen aus der Zwischenstufe „ACC“ heraus unterschiedlich auf die Aktivierung des Modus „Pilot“ und „Assistent“ auswirken (vgl. Kapitel 6.2), wurden die Daten der Modusgruppe „Fahrer selbst“ ( $N = 20$ ) sowie „ACC“ ( $N = 20$ ) inferenzstatistisch näher betrachtet. Analog zu den Erkenntnissen der ersten Studie war die Annahme hierbei, dass im Vergleich zur direkten Einschaltung, die „indirekte Transition“ auf den Modus „Pilot“ eher mit verzögerten Verhaltens- bzw. Blickreaktionen einhergeht und sich in subjektiven Angaben zur wahrgenommenen Transparenz des Übergangs

sowie in der Stärke der physiologischen Reaktion ausdrückt (vgl. Tabelle 21). Gleiches sollte sich im Unterschied zum indirekten Übergang auf „Assistent“ ergeben.

Unter Berücksichtigung des Versuchsdesigns (vgl. Abbildung 71) wurden demnach Varianzanalysen mit Messwiederholung gerechnet, in denen erneut der „Grad der Kontrollverschiebung“ (Endmodus) und die „Versuchsfahrt“ als Innersubjektfaktoren sowie die „Art der Transition“ (Startmodus) als Zwischensubjektfaktor eingingen.

Die Ergebnisdarstellung beginnt mit den Befunden aus der inferenzstatistischen Auswertung der Fahr- und Fragebogendaten. In die Analyse gingen die **Aktivierungsdauer** als objektives Maß der Reaktionsschnelligkeit (vgl. Tabelle 28) und die **subjektiven Bewertungen** zur Schnelligkeit der Reaktion, zur Verständlichkeit des Systemvorschlags und zur Nachvollziehbarkeit der Transition ein. Dabei zeigte die Testung der Innersubjekt- und Zwischensubjekteffekte die in Tabelle 31 aufgelisteten, signifikanten Ergebnisse auf univariater Ebene. Der „Grad der Kontrollverschiebung“ repräsentiert dabei den Endmodus und die „Art der Transition“ den Startmodus gemäß dem Versuchsplan aus Abbildung 71.

Tabelle 31: Signifikante Ergebnisse der Varianzanalyse der Fahr- und Fragebogendaten

Innersubjekteffekte	Kenngroßen	df, Fehler df	F	Signifikanz	Eta <sup>2</sup>
Versuchsfahrt	Subjektive Schnelligkeit der Reaktion	2, 16	11.27	.001	.585
Grad der Kontrollverschiebung	Aktivierungsdauer	1, 8	3.66	.092	.314
	Nachvollziehbarkeit der Transition	1, 8	7.34	.027	.479
Grad der Kontrollverschiebung x Art der Transition	Subjektive Schnelligkeit der Reaktion	1, 16	7.72	.024	.491
	Nachvollziehbarkeit der Transition	1, 16	9.91	.014	.553
Versuchsfahrt x Grad der Kontrollverschiebung	Verständlichkeit Systemvorschlag	2, 16	4.96	.021	.383
Versuchsfahrt x Grad der Kontrollverschiebung * Art der Transition	Verständlichkeit Systemvorschlag	2, 16	5.13	.019	.391
Zwischensubjekteffekte	Kenngroßen	df, Fehler df	F	Signifikanz	Eta <sup>2</sup>
Art der Transition	Subjektive Schnelligkeit der Reaktion	1, 8	72.89	.000	.901
	Verständlichkeit Systemvorschlag	1, 8	6.55	.034	.450

Mit Bezug zur Tabelle 31 ergaben sich für die in der Arbeit interessierende Wechselwirkung zwischen dem „Grad der Kontrollverschiebung“ und der „Art der Transition“ signifikante

Werte für die subjektiv wahrgenommene Reaktionsschnelligkeit und die Nachvollziehbarkeit der Transition. Dabei ist allerdings zu beachten, dass beide Variablen durch Haupteffekte überlagert sind (vgl. Tabelle 31). Nähere grafische Analysen wiesen hier eine ordinale Interaktion nach (Krüger, 1977), welche in Abbildung 84 zusätzlich dargestellt ist. Auf jener Basis kann abgeleitet werden, dass die wahrgenommene Reaktionsschnelligkeit auf einer 15-stufigen Antwortskala (1 = „gering“, 15 = „hoch“) bei den direkten Übergängen ( $M = 10.74$ ;  $SD = 2.09$ ) im Vergleich zu indirekten aus dem Zwischenmodus „ACC“ heraus ( $M = 5.87$ ;  $SD = 2.13$ ) höher ausfiel ( $p < .000$ ; vgl. Abbildung 84, links). Eine zur Variablen „wahrgenommene Reaktionsschnelligkeit“ vergleichbare Interpretation ist für die „Nachvollziehbarkeit der Transition“ gegeben. Infolge des ordinalen Anteils des Faktors „Grad der Kontrollverschiebung“ an der Wechselwirkung (vgl. Abbildung 84, rechts) zeigte sich generell eine bessere Nachvollziehbarkeit der Transition ( $p = .027$ ) auf den Modus „Pilot“ ( $M = 11.18$ ;  $SD = 2.51$ ) im Vergleich zum Modus „Assistent“ ( $M = 9.72$ ;  $SD = 2.60$ ).

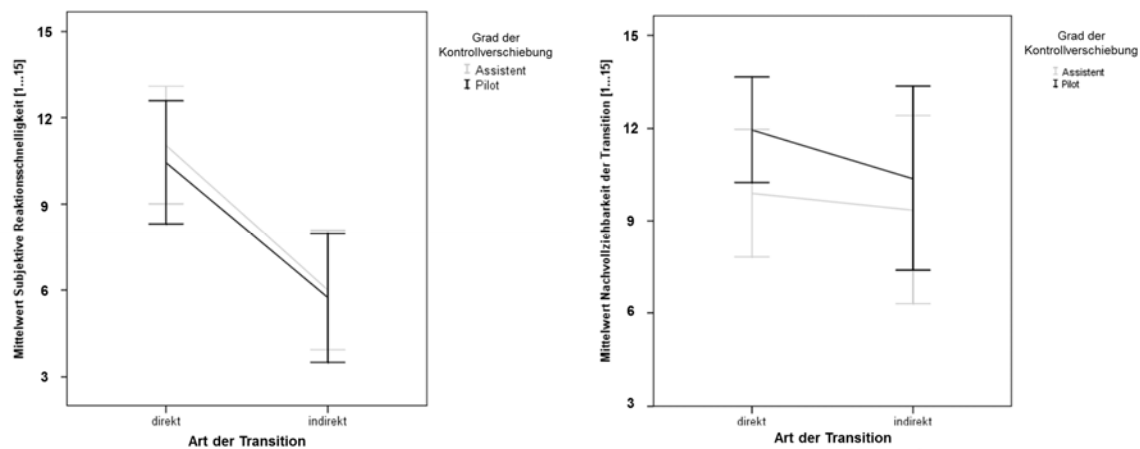


Abbildung 84: Wechselwirkungsdiagramme zwischen „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Art der Transition“ für die Variablen „Subjektive Reaktionsschnelligkeit“ (links) und „Nachvollziehbarkeit der Transition“ (rechts)

Das Ergebnis aus Abbildung 84 bestätigte sich tendenziell in der Aktivierungsdauer (vgl. Tabelle 31): Die Fahrer aktivierten den „Assistenten“ ( $M = 3.21$ ;  $SD = 0.93$ ) verglichen mit dem „Piloten“ ( $M = 2.69$ ;  $SD = 0.95$ ) zögerlicher (vgl. Anhang).

Im Hinblick auf die Variable „Verständlichkeit des Systemvorschlags“ sind die erhaltenen Effekte aus Tabelle 31 aufgrund disordinaler Anteile des Faktors „Art der Transition“ in den Profilplots der Varianzanalyse (vgl. Anhang) wie folgt zu interpretieren (Krüger, 1977): Die indirekten Transitionen auf „Pilot“ wurden von den Probanden in der ersten, übergangsrelevanten Versuchsfahrt (2. Fahrt) als weniger verständlich bezüglich des Systemangebots ( $M = 7.43$ ;  $SD = 2.64$ ) im Vergleich zur Kontrollverschiebung auf „Assistent“ ( $M = 11.29$ ;  $SD = 1.70$ ) eingestuft ( $F[1, 75] = 10.57$ ,  $p = .007$ ;  $\eta^2 = .485$ ). Dies spiegelt sich ebenfalls in

den Aktivierungsdauern für den Übergang wider ( $M_{\text{Fahrt } 2} = 3.42$ ,  $M_{\text{Fahrt } 3} = 2.67$ ,  $M_{\text{Fahrt } 4} = 2.84$ ). Trat der Übergang zu einem späteren Zeitpunkt im Verlauf der Fahrten auf, konnten die Testpersonen damit besser umgehen. Demgemäß zeigte sich eine lineare Zunahme der wahrgenommenen Verständlichkeit über die Fahrten hinweg ( $F[1, 75] = 11.70$ ,  $p = .009$ ;  $\eta^2 = .549$ ). Die Probanden passten sich an die Systemvorschläge aus „ACC“ heraus an. Interessanterweise deckt sich dieses Ergebnis nicht mit der subjektiv bewerteten Schnelligkeit der Reaktion (vgl. Tabelle 31). Jene wurde für die zweite Versuchsfahrt ( $M = 9.12$ ;  $SD = 3.15$ ) im Vergleich zur dritten ( $M = 7.85$ ;  $SD = 3.21$ ;  $p = .018$ ) und vierten ( $M = 7.96$ ;  $SD = 3.28$ ;  $p = .008$ ) signifikant höher auf der 15-stufigen Antwortskala eingestuft. Objektiv betrachtet unterschieden sich die Aktivierungsdauern allerdings nicht zwischen den Fahrten ( $F[2, 76] = 0.18$ ,  $p = .832$ ;  $\eta^2 = .005$ ).

Betrachtet man ergänzend dazu die **biophysiologicalen Daten**, fanden sich für die interessierende Interaktion zwischen dem „Grad der Kontrollverschiebung“ und der „Art der Transition“ keine signifikanten Unterschiede für die ausgewählten Indikatoren der kardiovaskulären und elektrodermalen Aktivität (vgl. Anhang). Folglich konnte auf Basis dieser Größen keine differentielle Aussage zur Auswirkung der Indirektheit der Transition auf die Modi „Assistent“ bzw. „Pilot“ getroffen werden.

Darüber hinausgehend zeigten sich die in Tabelle 32 dargestellten, signifikanten Ergebnisse. Jene setzten sich primär aus den isolierten Wirkungen der Faktoren „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Art der Transition“ zusammen. Sie interagierten zudem teilweise mit dem Faktor „Versuchsfahrt“.

Bei der Auswertung der **kardiovaskulären Parameter** (vgl. Tabelle 32) zeigten sich ausschließlich für die „Herzrate“ sowie die „Herzratenvariabilität“ signifikante Ergebnisse in den univariaten Tests der Innersubjekteffekte. Die Interpretation dieser Resultate erfolgte auf Basis der Profilplots der Varianzanalyse sowie über paarweise Vergleiche (Bonferroni-korrigiert). Jene führten beim Parameter „Herzrate“ zu folgender Schlussfolgerung: Diejenigen Probanden mit Übergang auf „Pilot“ wiesen in der letzten Versuchsfahrt ( $M = 71.98$ ;  $SD = 10.61$ ) im Vergleich zur vorherigen ( $M = 61.76$ ;  $SD = 13.82$ ) eine höhere, mittlere Herzrate auf ( $p = .024$ ). Ein gegensinniger Effekt konnte für die Herzratenvariabilität festgestellt werden. Allerdings gelang in dem Zusammenhang nur der Beleg, dass sich bei der Transition auf „Pilot“ im Vergleich zu „Assistent“ bei der dritten Fahrt eine höhere ( $M_{\text{Pilot}} = 70.45$  vs.  $M_{\text{Assistent}} = 57.85$ ;  $p = .058$ ) und bei der vierten eine geringere Herzratenvariabilität ( $M_{\text{Pilot}} = 57.64$  vs.  $M_{\text{Assistent}} = 71.33$ ;  $p = .042$ ) ergab. Darüber hinaus fiel der Unterschied innerhalb des Modus „Pilot“ signifikant zwischen diesen beiden Fahrten aus ( $p = .004$ ).

Tabelle 32: Signifikante Ergebnisse der Varianzanalyse der biophysiologicalen Daten\*

Innersubjekteffekte	Kenngrößen	df, Fehler df	F	Signifikanz	Eta <sup>2</sup>
Versuchsfahrt	Herzrate (HR <sub>M</sub> )**	2, 16	4.27	.033	.348
Versuchsfahrt x Art der Transition	Amplitudengröße	2, 16	4.50	.028	.360
	Erholungszeit	2, 16	4.64	.026	.367
Grad der Kontrollverschiebung	Amplitudengröße	1, 8	6.71	.032	.456
	Erholungszeit	1, 8	7.60	.025	.487
Versuchsfahrt x Grad der Kontrollverschiebung	Herzrate (HR <sub>M</sub> )	2, 16	4.94	.021	.382
	HRV***	2, 16	8.28	.003	.509
Zwischensubjekteffekte	Kenngrößen	df, Fehler df	F	Signifikanz	Eta <sup>2</sup>
Art der Transition	Amplitudengröße	1, 8	5.44	.041	.301
	Latenzzeit	1, 8	7.89	.032	.497
	Gipfelzeit	1, 8	6.76	.032	.458
	Erholungszeit	1, 8	15.95	.004	.666

\* Die Berechnung der Werte erfolgte für ein Zeitfenster von fünf Sekunden vor und 12 Sekunden nach der Transition

\*\* HR<sub>M</sub> = beat per minute (berechnet mit Hilfe der Auswertungssoftware)

\*\*\*HRV = Herzratenvariabilität (berechnet als prozentualer Anteil an der Maximalvarianz im mittleren Frequenzband)

Zusammenfassend spiegeln diese zwei Parameter der kardiovaskulären Aktivität jedoch eher unsystematische, versuchsfahrtabhängige Auswirkungen wider. Sie beinhalten keine eindeutig interpretierbaren Auffälligkeiten in der Art und Weise der Interaktion der Probanden mit den Systemmodi in den Transitionen. Demnach drücken sie auch keine systematischen Effekte einer möglichen Orientierungsreaktion aus. Analog zu den Erkenntnissen aus den Analysen zum „Grad der Kontrollverschiebung“ werden die Kennwerte daher als weniger sensitiv bzw. geeignet für die Beantwortung der Fragestellungen der Arbeit eingestuft (vgl. Kapitel 6.2).

Bei der Auswertung der **elektrodermalen Größen** der Hautleitfähigkeitsreaktion (vgl. Tabelle 32) zeigte sich in den paarweisen Vergleichen für die Parameter „Amplitudengröße“ und „Erholungszeit“ eine signifikant höhere Amplitude ( $p = .032$ ) sowie längere Erholungszeit ( $p = .039$ ) für Transitionen, in denen der Modus „Assistent“ aktiviert wurde. Zudem nahm die Amplitude bei den direkten Übergängen im Verlauf der Versuchsfahrten ab ( $F[2, 37] = 6.16$ ,  $p = .005$ ;  $\eta^2 = .250$ ). Dies ließ sich allerdings nicht für die indirekten Transitionen bestätigen ( $F[2, 35] = 1.31$ ,  $p = .283$ ;  $\eta^2 = .070$ ). Gleiches galt teilweise für die Erholungszeit ( $F[2, 37]_{\text{FS-Pilot}} = 4.24$ ,  $p = .022$ ;  $\eta^2 = .187$  vs.  $F[2, 37]_{\text{FS-Assistent}} = 2.57$ ,  $p = .191$ ;  $\eta^2 = .128$ ). Hier konnten zudem im Vergleich zu den indirekten Übergängen signifikant geringere Erholungszeiten bei der dritten ( $p = .022$ ) sowie vierten Testfahrt ( $p < .001$ ) festgestellt werden. Die Amplitude war außerdem im letzten Versuchsdurchgang geringer ( $M = 0.68$ ;  $SD = 0.20$ ) im Vergleich zu den indirekten Aktivierungen aus „ACC“ heraus ( $M = 0.93$ ;  $SD = 0.07$ ) ausge-

prägt ( $p < .001$ ). Die beschriebenen Effekte der Interaktion zwischen „Versuchsfahrt“ und „Art der Transition“ sind nochmals in Abbildung 85 dargestellt.

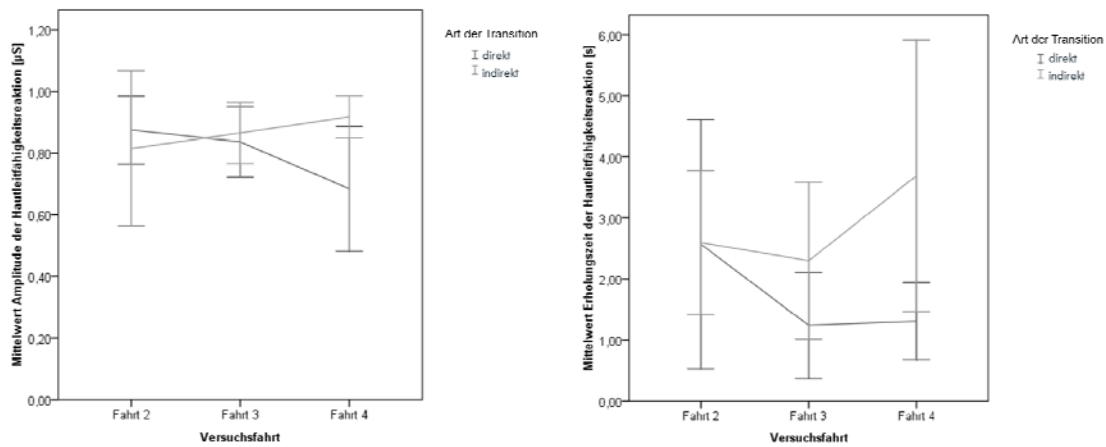


Abbildung 85: Wechselwirkungsdiagramme zwischen „Versuchsfahrt“ und „Art der Transition“ für die Variablen „Amplitudengröße“ (links) und „Erholungszeit“ (rechts) der Hautleitfähigkeitsreaktion

Nicht versuchsfahrtabhängig waren die Parameter Latenz- und Gipfelzeit der Hautleitfähigkeitsreaktion (vgl. Tabelle 32). Sie zeigten in den Analysen für die indirekte Transition, verglichen mit der direkten, eine längere Zeitdauer für den Reaktionsbeginn ( $p = .023$ ) und für die Erreichung des höchsten Punkts der Reaktion ( $p = .032$ ). Der Übergang aus der Zwischenstufe „ACC“ bewirkte folglich einen langsameren Aufbau der EDA-Kurve (vgl. Abbildung 86).

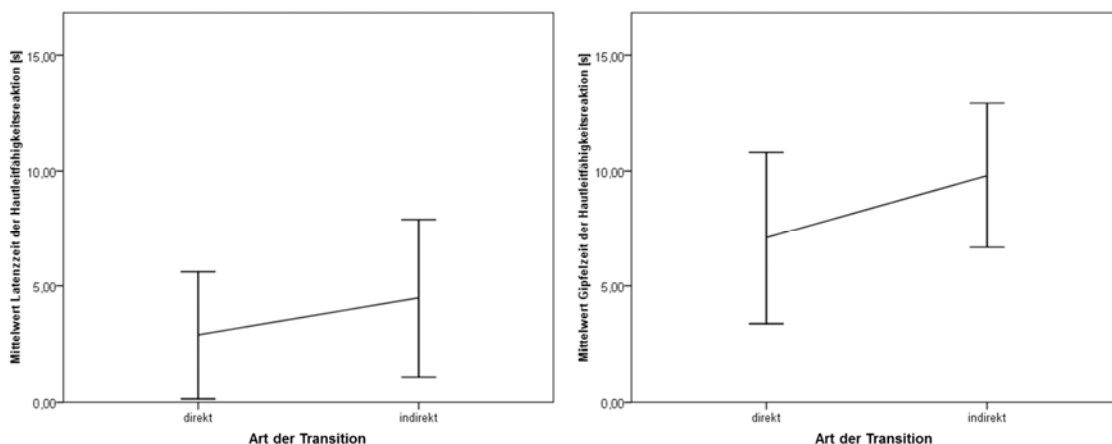


Abbildung 86: Haupteffekt „Art der Transition“ für die Variablen „Latenzzeit“ (links) und „Gipfelzeit“ (rechts) der Hautleitfähigkeitsreaktion

Da jedoch die anderen Parameter der Hautleitfähigkeitsreaktion kein vergleichbares Bild zeigten, ist die Annahme einer generell anderen Beanspruchungsqualität bei indirekten



Transitionen schwierig. Zudem gibt es in der Literatur keine Aussagen dazu, wie sich diese Größen der EDA bei erhöhter Beanspruchung verhalten (vgl. Kapitel 6.3.4). Es bedarf folglich weiterer Erkenntnisse aus anderen Parametern für deren Interpretation.

So führte die Auswertung der **Blickdaten** zu signifikanten Wechselwirkungen zwischen dem „Grad der Kontrollverschiebung“ und der „Art der Transition“. Diese betraf die Dauer des ersten Blickes auf die Systemzustandsanzeige ( $F[1, 12] = 7.80, p = .031; \eta^2 = .565$ ) und die Gesamtblickdauer ( $F[1, 12] = 7.92, p = .031; \eta^2 = .569$ ). Da gleichzeitig für den Innersubjektfaktor „Art der Transition“ eine signifikante Hauptwirkung für die Gesamtblickdauer ( $F[1, 6] = 24.80, p = .003; \eta^2 = .805$ ) vorlag, musste die Interpretation jener Interaktion unter Berücksichtigung der einzelnen Profilverläufe der Faktorenstufungen erfolgen. Die Abbildung 87 stellt dahingehend die Wechselwirkungsdiagramme zwischen dem „Grad der Kontrollverschiebung“ und der „Art der Transition“ für die beiden genannten Variablen dar. Diesbezüglich ist zu erwähnen, dass die Testteilnehmer zumeist zweimal auf die Systemzustandsanzeige blickten. Ein dritter Blick wurde in keinem Fall aufgewendet.

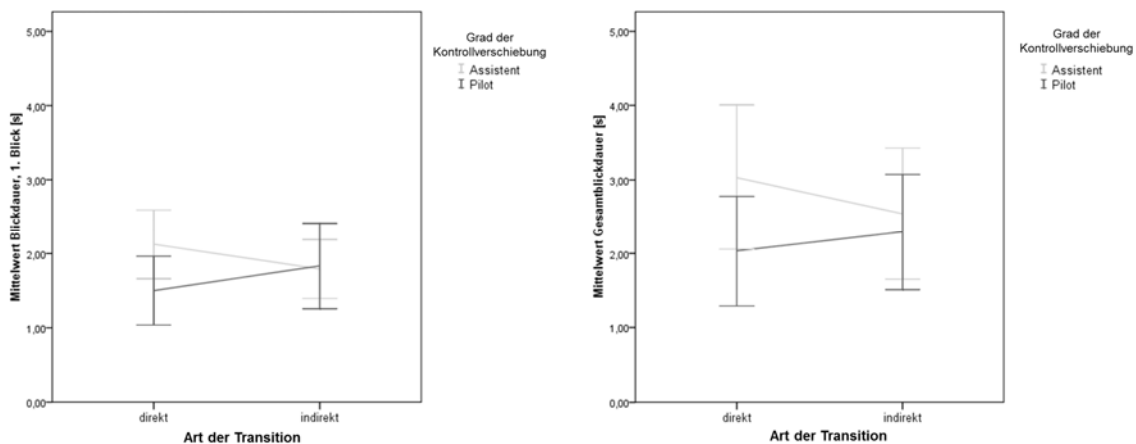


Abbildung 87: Wechselwirkungsdiagramme zwischen „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Art der Transition“ für die Variablen „Blickdauer (1. Blick; links)“ und Gesamtblickdauer (rechts)

Mit Bezug zur Abbildung 87 (links) kann für die Blickdauer des ersten Blicks geschlossen werden, dass die Probanden mit direktem Übergang auf „Assistent“ ( $M = 2.13; SD = 0.47$ ) in Referenz zur Transition auf „Pilot“ ( $M = 1.50; SD = 0.46$ ) länger auf das Display mit der Modusdarstellung schauten ( $p < .001$ ). Außerdem benötigten die Testpersonen bei der direkten Transition auf „Assistent“ ( $M = 2.13; SD = 0.47$ ) im Vergleich zum indirekten ( $M = 1.79; SD = 0.40$ ) tendenziell längere Blickdauern ( $p = .057$ ). Bei den Fahrern, welche den Modus „Pilot“ aktivierten, konnte dies nicht bestätigt werden ( $F[1, 25] = 2.78, p = .108; \eta^2 = .100$ ). Dennoch variierten die Messwerte zwischen den beiden Arten der Transition ( $M_{\text{direkt}} = 1.50$  vs.  $M_{\text{indirekt}} = 1.83$ ).

Ein vergleichbarer Profilverlauf bestand für die Gesamtblickdauer (vgl. Abbildung 87, rechts). Demgemäß blickten die Probanden mit direktem Übergang auf „Assistent“ ( $M = 3.03$ ;  $SD = 0.97$ ) in Referenz zu „Pilot“ ( $M = 2.03$ ;  $SD = 0.74$ ) länger auf die Systemzustandsanzeige ( $p = .003$ ). Trotz fehlender Signifikanz ( $F[1, 26] = 1.86$ ,  $p = .184$ ;  $\eta^2 = .067$ ) ist dabei interessant, dass die direkte Transition auf „Assistent“ mit einer 0.49 s längeren Gesamtblickdauer einherging als diejenige über „ACC“.

In Ergänzung zu den Blickdaten konnte bei der Analyse der **Videos** erneut ein interessantes Phänomen beobachtet werden (vgl. Abbildung 88).

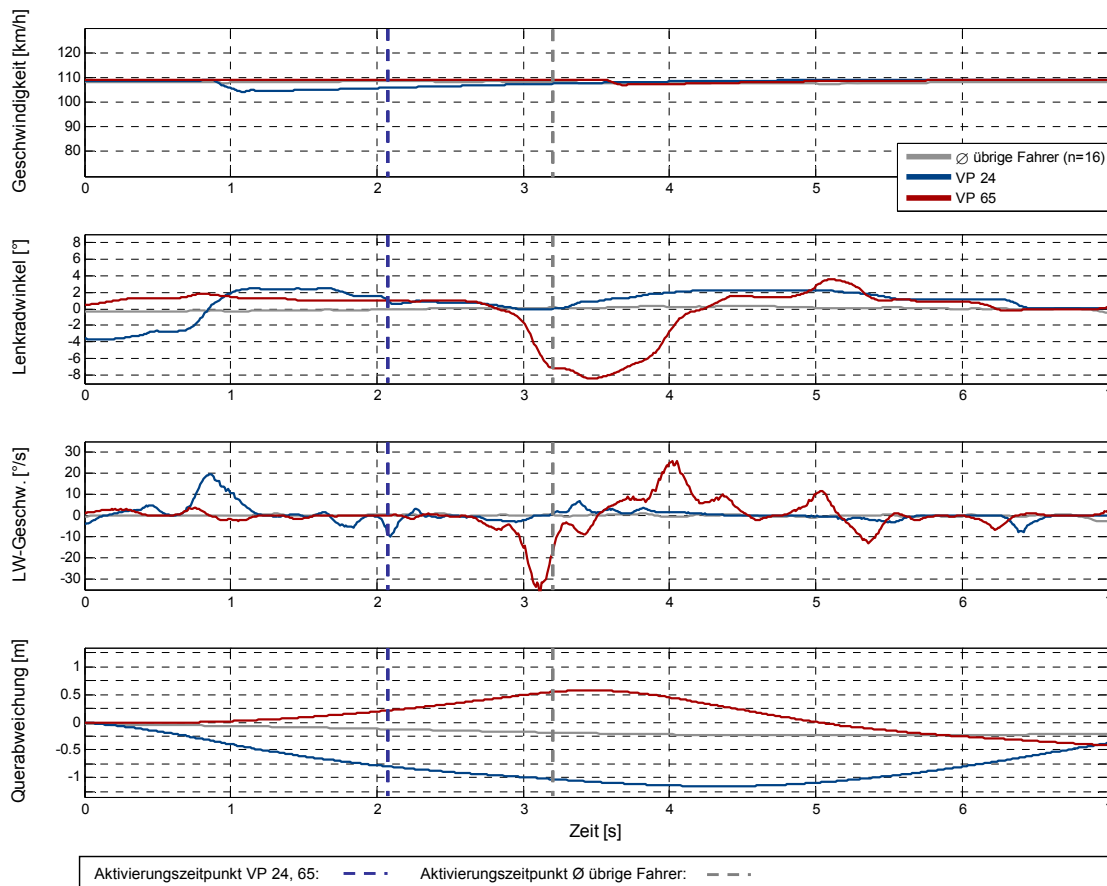


Abbildung 88: Verlauf der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen für die indirekte Transition auf den Systemmodus „Assistent“ (Zeitpunkt 0 = Systemangebot)

Gemäß Abbildung 88 zeigten zwei der Versuchsteilnehmer mit indirekten Transitionen aus „ACC“ heraus (VP 24, 65) ein auffälliges Verhalten in der Aktivierungsphase des Modus „Assistent“. So nahmen diese in der kognitiven Fehlannahme, den „Piloten“ einzuschalten, die Hände vom Lenkrad. Jene **Modusverwechslung** führte wiederum zu einer regelungsbedingten Abweichung von der Fahrspur (vgl. Abbildung 88). Ein markantes Blickverhalten nach der Aktivierung konnte allerdings nicht beobachtet werden. Hierfür zeigte sich in der

Analyse der Fahr- und Videodaten, dass der Proband mit der Nummer 24 erst nach 26 s verstanden hatte, dass sich das Fahrzeug im Modus „Assistent“ befand. So übernahm er nach anfänglichen Korrekturen der Spurhaltung erst zu diesem Zeitpunkt vollständig die Querführung. Darüber hinaus fiel auf, dass die zwei „auffälligen“ Testpersonen VP 24 und VP 65 in Referenz zu den übrigen Fahrern relativ frühzeitig das Systemangebot bestätigten ( $M_{VP24} = 2.1$  s;  $M_{VP65} = 2.1$  s;  $M_{VP\text{Rest}} = 3.23$  s).

Den Abschluss der Auswertung bildeten erneut **Korrelationsanalysen** nach Pearson, um ein globales Bild über die einzelnen Zusammenhänge zwischen den betrachteten Variablen zu erhalten. Die dahingehend gefundenen, signifikanten Korrelationen sind in Tabelle 33 dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nur für die signifikant gewordenen Parameter der Fahr-, Fragebogen-, Blick- und biophysiologicalen Daten Zusammenhänge berechnet wurden. Korrelationen zwischen zwei Variablen werden zudem nur einmal je Kennwert berichtet. Insgesamt ergaben sich Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten, deren Stärke nach Cohen (1988) überwiegend als gering ( $r < 0.50$ ) einzustufen ist.

Tabelle 33: Signifikante Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten (summierter Wert)

	Kennwerte	Signifikante Korrelationen
<b>Fahrdaten</b>	<b>Aktivierungsdauer</b>	Blickdauer gesamt ( $r[55] = .345^{**}$ )
<b>Fragebogendaten</b>	<b>Reaktionsschnelligkeit</b>	Erholungszeit ( $r[76] = -.305^{**}$ )
	<b>Nachvollziehbarkeit der Transition</b>	Verständlichkeit des Systemangebotes ( $r[75] = .723^{**}$ )
<b>Biophysio- logische Daten</b>	<b>HR (M)</b>	HRV ( $r[73] = -.474^{**}$ )
	<b>Latenzzeit Hautleitfähigkeits- reaktion</b>	Gipfelzeit ( $r[78] = .773^{**}$ )
	<b>Gipfelzeit Hautleitfähigkeits- reaktion</b>	Anstiegszeit ( $r[78] = .528^{**}$ )
<b>Blickdaten</b>	<b>Dauer 1. Blick auf Systemzu- standsanzeige</b>	Blickdauer gesamt ( $r[54] = .537^{**}$ )

\*\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.01 (2-seitig) signifikant

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse zur Auswirkung des Transitionsmerkmals „Ähnlichkeit von Systemmodi“ auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion in Übernahmesituationen eingegangen (vgl. Kapitel 6.2).

### Ähnlichkeit von Systemmodi

Zur Beantwortung der Frage, ob sich Transitionen zwischen einander sehr ähnlichen Systemmodi negativ auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion auswirken (vgl. Kapitel 6.2), wurden

die Daten der Gruppe „Assistent“ näher betrachtet ( $N = 20$ ). Der Fokus lag hierbei auf denjenigen Übergängen, die mit einer Aktivierung des Modus „Pilot“ einhergingen (vgl. Abbildung 71). Vergleichend dazu erfolgte der Einbezug der Transitionen aus „Fahrer selbst“ in dieses hochautomatisierte System ( $N = 20$ ). Im Unterschied zum Übergang aus der manuellen Fahrt, sollte die Aktivierung aus einer komplexeren und zugleich funktional ähnlichen Fahrfunktion eher mit verzögerten Verhaltens- bzw. Blickreaktionen, subjektiven Angaben der Intransparenz und stärkeren Orientierungsreaktionen in physiologischen Kenngrößen einhergehen (vgl. Tabelle 21). Unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse ist zudem offen, ob eine Verwechslung der beiden Modi auch bei Transitionen zwischen den Systemen dokumentiert werden kann.

Die statistische Auswertung der objektiven und subjektiven Daten erfolgte analog zum Versuchsdesign (vgl. Abbildung 71) mittels multivariater Varianzanalyse mit Messwiederholung. Als Innersubjektfaktor ging diesbezüglich die „Versuchsfahrt“ ein, um Effekte über die Zeit abschätzen zu können. Als Zwischensubjektfaktor diente derjenige Modus, aus dem die Kontrollverschiebung in das hochautomatisierte System erfolgte (FS vs. Assistent).

Die Ergebnisdarstellung beginnt wiederum mit der Auswertung der Fahr- und Fragebogendaten. In diese Analyse gingen die **Aktivierungsdauer** (vgl. Tabelle 28) und die **subjektiven Bewertungen** zur Schnelligkeit der Reaktion, zur Verständlichkeit des Systemvorschlags und zur Nachvollziehbarkeit der Transition ein. Dabei zeigten sich nur für den Zwischensubjektfaktor signifikante Effekte. Diese sind in Tabelle 34 aufgelistet.

Tabelle 34: Signifikante Ergebnisse der Varianzanalyse der Fahr- und Fragebogendaten

Zwischensubjekteffekt	Kenngrößen	df, Fehler df	F	Signifikanz	Eta <sup>2</sup>
Modus aus dem, die Transition startete („Fahrer selbst“ vs. „Assistent“)	Aktivierungsdauer	1, 13	3.94	.046	.377
	Subjektive Reaktionsschnelligkeit	1, 13	38.17	.000	.854
	Nachvollziehbarkeit der Transition	1, 13	4.12	.041	.388

Bezüglich der Aktivierungsdauer (vgl. Abbildung 89, links) ergab sich, dass die Probanden mit Übergang „Assistent-Pilot“ ( $M = 3.54$ ;  $SD = 1.07$ ) im Vergleich zu denen mit „FS-Pilot“ ( $M = 2.50$ ;  $SD = 0.40$ ) signifikant mehr Zeit für die Bestätigung des Systemangebots benötigten ( $p = .048$ ). Zudem wichen zwei der Versuchspersonen (VP 48, VP 78), die aus dem Modus „Assistent“ den „Piloten“ einschalteten, deutlich von Werten der übrigen Testpersonen ab. Sie wurden allerdings nicht als Ausreißer in der Boxplotanalyse markiert (vgl. Abbildung 89, rechts). Es zeigte sich jedoch, dass der Proband mit der Nummer 48 den

„Piloten“ nach 4.49 s und der Proband mit der Nummer 78 nach 4.70 s aktivierte (vgl. Abbildung 89, rechts). Im Vergleich zum Mittelwert der übrigen Testpersonen ( $M = 3.26$  s), wiesen sie demnach eine stark verzögerte Reaktion auf, welche für die Schwierigkeit des Nachvollziehens des Übergangs sprechen könnte.

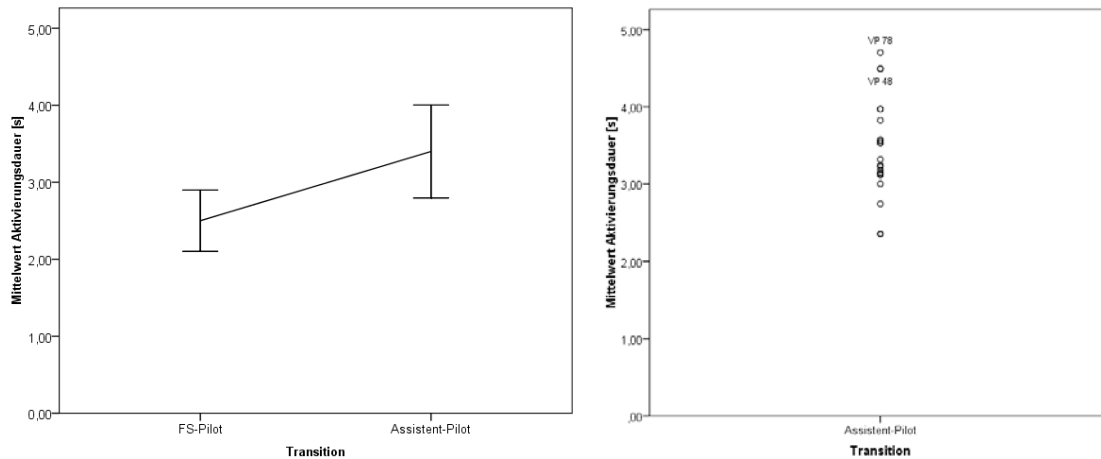


Abbildung 89: Fehlerbalkendiagramm (links) und Streudiagramm (rechts) für die mittlere Aktivierungsdauer [s] für Transitionen auf den Modus „Pilot“ aus „Fahrer selbst“ bzw. „Assistent“

Analog zu den Erkenntnissen zur Aktivierungsdauer zeigten die Angaben zur subjektiven Reaktionsschnelligkeit ein ähnliches Bild (vgl. Abbildung 90, links). So beurteilten die Versuchsteilnehmer ihre Reaktion beim Übergang „Assistent-Pilot“ ( $M = 6.50$ ;  $SD = 1.32$ ) im Vergleich zu „FS-Pilot“ ( $M = 9.65$ ;  $SD = 2.70$ ) auf der 15-stufigen Antwortskala (1 = geringe Ausprägung, 15 = hohe Ausprägung) als signifikant langsamer ( $p < .000$ ). Dies scheint nicht durch das Verständnis für das Systemangebot selbst bedingt zu sein ( $F[2, 13] = 1.92$ ,  $p = .186$ ;  $\eta^2 = .228$ ). Die Probleme bestanden eher darin, die einander sehr ähnlichen Systemmodi in ihrem Funktionsumfang voneinander zu trennen. Die Probanden mussten den damit verbundenen Unterschied in der Regelung der Systeme nachvollziehen. Gemäß Abbildung 90 (rechts) fanden die Testteilnehmer den Übergang „FS-Pilot“ ( $M = 11.95$ ;  $SD = 1.70$ ) im Vergleich zu „Assistent-Pilot“ ( $M = 9.45$ ;  $SD = 2.01$ ) transparenter ( $p = .001$ ).

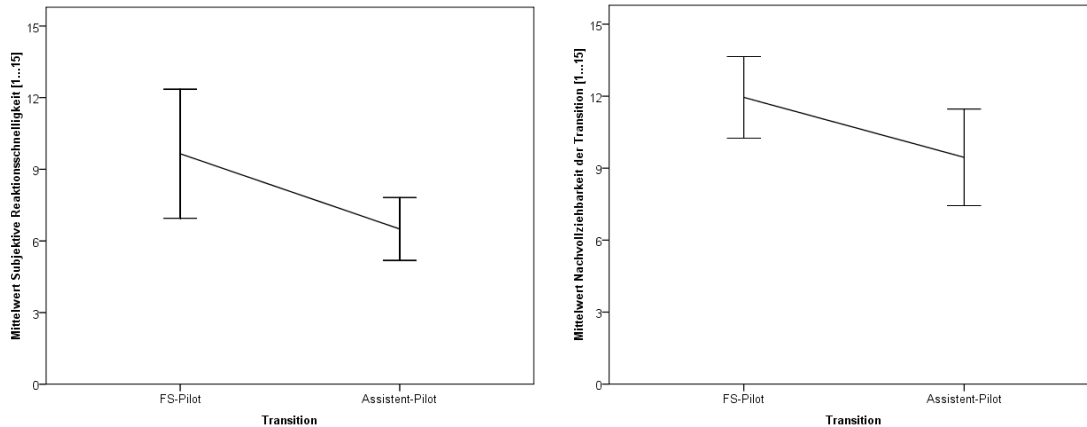


Abbildung 90: Wahrgenommene Reaktionsschnelligkeit (links) und Nachvollziehbarkeit der Transition (rechts) für Übergänge auf den Modus „Pilot“ aus „Fahrer selbst“ und „Assistent“

Interessant ist in dem Zusammenhang, dass die Aktivierung des „Piloten“ aus dem Modus „ACC“ heraus gleichfalls geringere Bewertungen der Nachvollziehbarkeit bewirkte ( $M = 10.11$ ;  $SD = 2.59$ ). Es könnte den Probanden demnach auch grundsätzlich schwerer fallen, den Modus „Pilot“ aus einer geringer automatisierten Funktion heraus zu aktivieren. Daher wurde geprüft, wie die einzelnen Systeme von den Versuchsteilnehmern in ihrer generellen Funktionalität wahrgenommen wurden. Dementsprechend zeigte der Vergleich der subjektiven Bewertungen der Fahrten mit „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ das in Abbildung 91 dargestellte Bild. Die Bewertungen erfolgten auf der 15-stufigen Antwortskala nach Heller (1985) in der Abschlussbefragung. Hohe Ausprägungen auf der Skala gingen mit hohen Ausprägungen auf den jeweiligen Items einher.

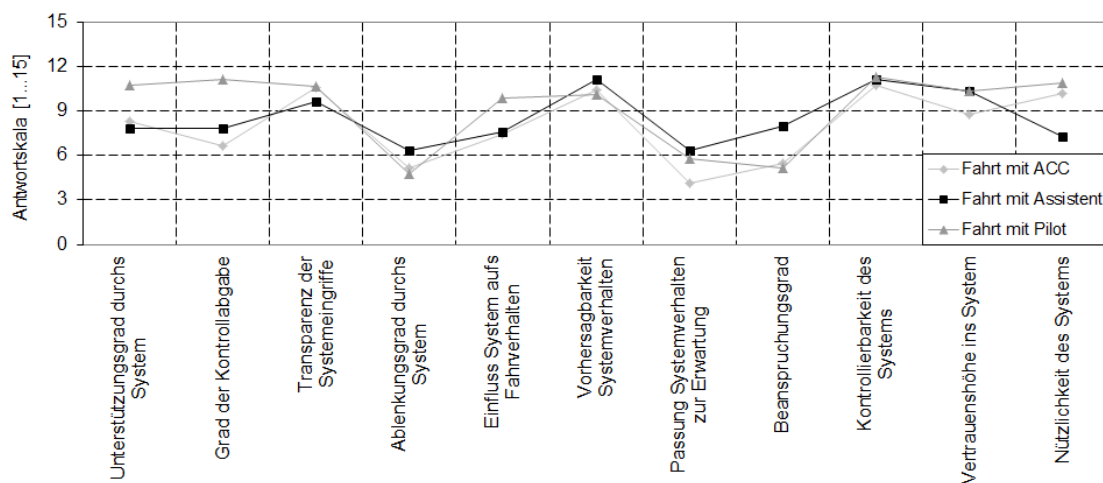


Abbildung 91: Subjektive Bewertungen der Modi „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ (Mittelwert)

Unter Berücksichtigung der durchgeführten paarweisen Vergleiche, zeigte sich für die Verläufe der Abbildung 91, dass der Modus „Pilot“ im Vergleich zu den Modi „Assistent“ ( $p = .032$ ) und „ACC“ ( $p = .087$ ) als unterstützender wahrgenommen wurde. Außerdem bewerteten die Probanden den Kontrollabgabegrad bei diesem System am höchsten (Pilot vs. „Assistent“:  $p = .004$ ; „Pilot“ vs. „ACC“:  $p < .000$ ).

Darüber hinaus fühlten sich die Testpersonen durch den Modus „Assistent“ ( $M = 7.95$ ;  $SD = 4.20$ ) am meisten bei der Fahrt beansprucht („Pilot“:  $M = 5.15$ ;  $p = .039$ ; „ACC“:  $M = 5.42$ ;  $p = .073$ ). Die Modi „ACC“ und „Pilot“ wurden zudem im Vergleich zu dem System als nützlicher bewertet ( $p_{ACC} = .014$  vs.  $p_{Pilot} < .001$ ). In diesem Zusammenhang äußerten die Testpersonen Bedenken über die parallele Verfügbarkeit von einander sehr ähnlichen Fahrfunktionen. Als analoges Beispiel wurde dabei häufig der Vergleich zwischen „ACC“ und „Tempomat“ herangezogen. So gaben die Fahrer demgemäß an, Schwierigkeiten bei der Unterscheidung der zwei Funktionen zu haben (vgl. hierzu auch Petermann & Schlag, 2010). Demgemäß sehen sie die Gefahr einer Verwechslung der Systeme „Assistent“ und „Pilot“ und würden eher die höher automatisierte Funktion im Fahrzeug präferieren.

Betrachtet man ergänzend dazu die Werte der **biophysiologicalischen Daten** fanden sich ausschließlich für den Zwischensubjektfaktor signifikante Effekte (vgl. Anhang). Es ließen sich dabei keine Unterschiede in den **kardiovaskulären Daten**, jedoch in den **elektrodermalen Parametern** nachweisen (vgl. Anhang). Diesbezüglich variierten nur die Variablen „Amplitudengröße“ und „Erholungszeit“ der Hautleitfähigkeit signifikant zwischen demjenigen Modus, aus dem die Transition auf „Pilot“ erfolgte. Die dahingehenden Werte der Varianzanalyse finden sich in Tabelle 35.

Tabelle 35: Signifikante Ergebnisse der Varianzanalyse der biophysiologicalischen Daten

Zwischensubjekteffekt	Kenngößen	df, Fehler df	F	Signifikanz	Eta <sup>2</sup>
Modus aus dem, die Transition startete („Fahrer selbst“ vs. „Assistent“)	Amplitudengröße	2, 10	7.04	.012	.585
	Erholungszeit	2, 10	13.06	.001	.735

Die spezifische Analyse dieser zwei peripherphysiologischen Maße mittels post-hoc Tests zeigte, dass die Amplitude beim Übergang „FS-Pilot“ ( $M = 0.50$ ;  $SD = 0.36$ ) im Vergleich zu „Assistent-Pilot“ ( $M = 0.85$ ;  $SD = 0.15$ ) signifikant geringer ausfiel ( $p = .021$ ; vgl. Abbildung 92, links). In dem Zusammenhang war interessant, dass sich die Erholungszeiten in genau gleicher Richtung verhielten (vgl. Abbildung 92, rechts). So fielen diese bei denjenigen Probanden, die eine Transition zwischen den einander sehr ähnlichen Modi „Assistent“ und „Pilot“ erlebten, signifikant länger aus ( $M = 1.73$ ;  $SD = 0.99$ ;  $p = .035$ ) als in

Referenz zur Aktivierung des „Piloten“ aus dem Modus „FS“ aus ( $M = 1.05$ ;  $SD = 1.86$ ). Jenes Ergebnis deckt sich mit den von Boucsein (2006) beschriebenen Reaktionsmustern des autonomen Nervensystems (vgl. Kapitel 6.4.3) und spricht für eine verstärkte Aktivität des Effort-Systems. Die Transition von „Assistent“ auf „Pilot“ führte demnach zu einer deutlich veränderten Informationsverarbeitung mit erhöhter Aufmerksamkeitszuwendung.

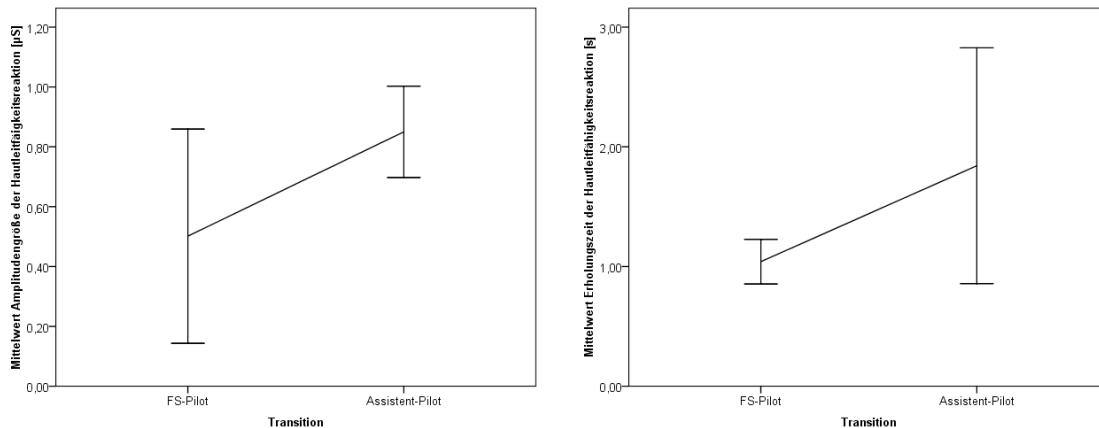


Abbildung 92: Amplitudengröße (M, SD; links) und Erholungszeit (M, SD; rechts) der Hautleitfähigkeitsreaktion für Transitionen auf den Modus „Pilot“ aus „Fahrer selbst“ bzw. „Assistent“

In Analogie zu den bereits dargestellten Ergebnissen bestätigte die varianzanalytische Auswertung der **Blickdaten** ebenso eine signifikante Hauptwirkung des Zwischensubjektfaktors. Diese betraf den ersten Blick auf das Display mit den Systemzustandsanzeigen ( $F[2, 8] = 4.45$ ,  $p = .050$ ;  $\eta^2 = .527$ ) und resultierte aus dem Vergleich der Übergänge „FS-Pilot“ ( $M = 1.50$ ;  $SD = 0.20$ ) mit „Assistent-Pilot“ ( $M = 2.1$ ;  $SD = 0.26$ ). Demgemäß zeigte sich bei denjenigen Probanden, die eine Transition zwischen einander sehr ähnlichen Systemmodi erlebten, eine tendenziell verlängerte Blickdauer ( $p = .065$ ).

Die Analyse der **Videos** zeigte darüber hinaus keine Auffälligkeiten im Verhalten der Probanden, die in Richtung Mode Confusion interpretierbar sind. Es konnten allerdings zwei Versuchspersonen identifiziert werden, die verzögert auf das Systemangebot reagierten. Jene entsprachen denjenigen Fahrern, auf die bereits bei der Darstellung der Ergebnisse zur Aktivierungsdauer eingegangen wurde (vgl. VP 48 und VP 78 in Abbildung 89, rechts).

Die abschließende Untersuchung der **korrelativen Beziehungen** innerhalb der betrachteten Datenbasis führte auf der Grundlage von Produkt-Moment-Korrelationen nach Pearson zu folgenden, signifikanten Zusammenhängen zwischen den erhobenen Daten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass wiederum nur auf diejenigen Variablen eingegangen wird, welche in der vorangegangenen Auswertung zu signifikanten Unterschieden führten (vgl. Tabelle 36).



Tabelle 36: Signifikante Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten (summierter Wert)

	Dauer der Aktivierung	Subjektive Reaktions-schnelligkeit	Größe der Amplitude	Erholungszeit	Dauer 1. Blick
Dauer der Aktivierung	1,000	-,271*	-	,387**	-
Subjektive Reaktions-schnelligkeit	-,271*	1,000	-	-	-
Größe der Amplitude	-	-	1,000	,365**	-,628*
Erholungszeit	,387**	-	,365**	1,000	-
Dauer 1. Blick	-	-	-,628*	-	1,000

\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

\*\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

#### 6.5.1.1 Zwischenfazit: Transitionen in Richtung Automation

In der Fahrsimulatorstudie wurden Transitionssituationen betrachtet, welche gemäß des Ansatzes der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 4.2) die Merkmale „Grad der Kontrollverschiebung“, „Indirekte Transition“, „Ähnlichkeit von Systemmodi“ und „Richtung der Transition“ abbilden. Für die Aktivierung unterschiedlicher Grade an Automation erfolgte diesbezüglich die Annahme, dass der Fahrer beim Systemmodus „Assistent“ stärker gefordert ist, Teilfunktionen der Automation in Relation zur eigenen Rolle bei der Fahrzeugführung abzuschätzen (vgl. Kapitel 6.2). Demnach sollte weniger das Ausmaß an Automatisierung selbst entscheidend sein, sondern der kognitive Aufwand bei der Differenzierung noch zu übernehmender Anteile der Fahraufgabe. „Indirekte Transitionen“ aus dem Modus „ACC“ könnten hierbei das Verständnis für das System fördern. Sie sollten jedoch zu mehr Intransparenz führen, wenn die Funktion vom Fahrer eher als Gesamtsystem wahrgenommen wird. Dabei ist zudem wichtig, welche Fahrfunktionen innerhalb der Automationsstufen gleichzeitig im Fahrzeug verfügbar sind. Demgemäß wurde postuliert, dass einander funktional ähnliche Systeme mit höherer Wahrscheinlichkeit zum Auftreten von Mode Confusion oder Mode Errors führen. Dies sollte in Aktivierungsphasen die Modi „Assistent“ und „Pilot“ betreffen. Einbußen im Modusbewusstsein könnten sich in Form von verzögerten oder ausbleibenden Handlungen zeigen, verstärkte Blick- bzw. Orientierungsreaktionen verursachen oder sich in subjektiven Bewertungen zur wahrgenommenen Transparenz der Transition widerspiegeln.

Aus den Ergebnissen der Übergabesituationen in Richtung Automation lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- **Grad der Kontrollverschiebung:**

Gemäß der Annahme hat weniger der Grad der Kontrollverschiebung, also das Ausmaß an Automatisierung, einen Einfluss auf das Bewusstsein des Fahrers über den Systemmodus. Es spielt eher der kognitive Aufwand bei der Differenzierung noch zu übernehmender Anteile der Fahraufgabe eine Rolle. Demgemäß benötigten die Probanden für die Aktivierung des Modus „Assistent“ mehr Zeit, um sich ein Bewusstsein über die Funktionsaufteilung zu verschaffen. Im Gegensatz zur Transition auf „ACC“ bzw. „Pilot“ bewerteten sie zudem den Übergang als weniger gut nachvollziehbar. So wünschten sie sich bevorzugt eine Einschaltung des Systems über Zwischenstufen der Automation. Die höhere Beanspruchung der Fahrer bei der Transition spiegelte sich zudem in biophysiologicalen Maßen und im Blickverhalten wider. So wiesen die Probanden mit Übergang auf den „Assistent“ im Vergleich zu den anderen Kontrollverschiebungen größere Amplituden der Hautleitfähigkeitsreaktion mit längerer Erholungszeit beim ersten Erleben der Transition aus der manuellen Fahrt heraus auf. Die Reaktionsmuster in diesen elektrodermalen Parametern unterstreichen die veränderte Informationsverarbeitung mit verstärkter Orientierungsreaktion sowie Aktivität des Effort-Systems (Boucsein, 1992). Parallel dazu schauten die Testteilnehmer länger auf das Display mit der Systemzustandsanzeige, bevor sie die Funktion aktivierten. Insbesondere der erste Blick auf die Anzeige spiegelte das verstärkte Suchverhalten der Fahrer bei intransparenten Übergängen wider.

- **Grad der Kontrollverschiebung \* Indirekte Transition**

Die angenommene Wechselwirkung der Merkmale „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Indirekte Transition“ kann nur für die wahrgenommene Verständlichkeit des Systemvorschlags eindeutig bestätigt werden. Es zeigte sich hierbei eine geringere Ausprägung für die „indirekte Transition“ auf den Modus „Pilot“ im Vergleich zu „Assistent“. Dies spiegelte sich gleichfalls in den Aktivierungsdauern für das Angebot wider. Dabei ist zu beachten, dass der Effekt nur bei derjenigen Fahrt auftrat, in der die Probanden den indirekten Übergang das erste Mal erlebten. Im Verlauf der Versuchsfahrten gewöhnten sie sich an die Aktivierung des Modus „Pilot“ aus „ACC“. Zugleich ergaben sich bei der Probandengruppe, welche den „Assistenten“ einschalteten, tendenziell kürzere Blickdauern auf die Systemzustandsanzeige beim indirekten Übergang im Vergleich zum direkten.

Als globaler Effekt zeigte sich, dass Übergänge aus „ACC“ generell mit einer subjektiv langsameren Reaktionsschnelligkeit einhergehen und Transitionen auf „Pilot“ bes-

ser nachvollziehbar sind. Zudem bestätigte sich erneut anhand der elektrodermalen Parameter die höhere Beanspruchung bei der Aktivierung des Systems „Assistent“. Sie ging mit einer größeren Amplitude und längeren Erholungszeit der Hautleitfähigkeitsreaktion einher. Die Testteilnehmer schauten darüber hinaus länger auf das Display mit der Systemzustandsanzeige.

- **Ähnlichkeit von Systemmodi**

Im Vergleich zu Kontrollverschiebungen aus der manuellen Fahrt heraus, führt ein Übergang aus einem funktional ähnlichen Systemmodus zu Einbußen im Bewusstsein über das zu aktivierende System. Dies schlägt sich bei der Transition „Assistent-Pilot“ in Referenz zu „FS-Pilot“ in längeren Aktivierungsdauern und einer subjektiv geringeren Reaktionsschnelligkeit sowie Nachvollziehbarkeit des Übergangs nieder. Die Probanden äußern zudem Bedenken darüber, dass sie die beiden Fahrfunktionen miteinander verwechseln könnten. Zudem zeigt sich, dass der Modus „Assistent“ für die Fahrer als beanspruchender wahrgenommen und der Modus „Pilot“ mit einer größeren Abgabe der Kontrolle verbunden wird. Auf biophysiologicaler Ebene ließen sich die angenommenen Unterschiede zusätzlich bestätigen. So gingen die Amplitudengröße und die Erholungszeit der Hautleitfähigkeitsreaktion mit höheren Werten bei der Transition zwischen funktional ähnlichen Systemen einher. Analog dazu variierte die Dauer des ersten Blicks auf die Anzeige mit dem Modusangebot. Sie war länger beim Übergang „Assistent-Pilot“ im Vergleich zu „FS-Pilot“ ausgeprägt.

- **Mode Confusion**

Innerhalb der Transitionen in Richtung Automation konnten erneut „Automation Surprises“ in Form von Verwechslungen von Systemmodi bei vier Testteilnehmern festgestellt werden. Derartige Einbußen im Modusbewusstsein zeigten sich immer dann, wenn das Funktionsangebot sehr schnell bestätigt wurde. In jenen Fällen kann von einer erwartungsbasierten Handlung ausgegangen werden, die aufgrund der Annahme einer Aktivierung des Modus „Pilot“ zu einer inadäquaten Aufnahme von Informationen über die Statusanzeige führte. Die kognitive Fehlannahme einer „Pilotfunktion“ ging dann mit einer unangemessenen Handlung in Form eines „error of commission“ einher. Die Probanden nahmen die Hände von Lenkrad. Interessant daran ist, dass es teilweise sehr lange gedauert hat, bis den Testpersonen der Fehler auffiel. Die Probanden versuchten dabei häufig zunächst eine Korrektur des Fahrzeugverhaltens. Sie blickten demnach nicht auf die Statusanzeige, sondern berücksichtigten das Feedback aus der Fahrzeugreaktion. Anhand dieser Ergebnisse zeigt sich erneut, wie sensitiv Aktivierungsphasen für Mode Confusion sind. Wesentlich ist

dabei die Verfügbarkeit von Systemen im Fahrzeug, die einander sehr ähnlich im Funktionsumfang wahrgenommen werden.

Ergänzend zu diesen Erkenntnissen werden im Folgenden die Befunde für die Transitionen in Richtung Fahrer dargestellt.

### 6.5.2 Zweiter Ergebnisblock: Transitionen in Richtung Fahrer

Für diesen Ergebnisteil wurden insgesamt 120 Übergabesituationen in Richtung Fahrer analysiert. Jene resultieren aus der Anzahl der Versuchspersonen, welche je nach Modusgruppe die in Abbildung 79 dargestellten Transitionen erlebt haben. Die Auswertung erstreckt sich von der Übernahmedauer über die subjektiven Daten und setzt sich anschließend mit der Prüfung der biophysiologicalen Maße sowie des Blickverhaltens fort. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bezüglich der biophysiologicalen Kennwerte entschieden wurde, nur die elektrodermalen Größen weiterhin zu betrachten. Hintergrund dessen ist, dass sich die kardiovaskulären Parameter als nicht sensitiv für die Beantwortung der Fragestellungen dieser Arbeit in der Ergebnisauswertung zu Transitionen in Richtung Automation herausgestellt haben (vgl. Kapitel 6.5.1). Darüber hinaus ergaben die Erkenntnisse zur Aktivierung höherer Automatisierungsstufen, dass nur die Amplitudengröße und die Erholungszeit der Hautleitfähigkeit Reaktionsmuster abbilden, die auf eine Orientierungsreaktion bzw. verstärkte Aktivität des Effort-Systems hindeuten. Daher basieren die nachfolgenden Analysen ausschließlich auf diesen elektrodermalen Kennwerten. Analog zum Kapitel 6.5.1 differenziert die Ergebnisdarstellung zudem zwischen den Transitionsmerkmalen „Grad der Kontrollverschiebung“, „Grad der Kontrollverschiebung \* Indirekte Transition“ und „Ähnlichkeit von Systemmodi“ (vgl. hierzu Kapitel 6.2).

#### Grad der Kontrollverschiebung

Bei der Analyse des „Grads der Kontrollverschiebung“ ging es um die Beantwortung der Frage, ob mit zunehmenden Grad der vorausgehenden Entbindung aus der Fahraufgabe höhere Anforderungen an den Fahrer bei der Rückübergabe der Kontrolle gestellt werden (vgl. Tabelle 22). So sollte die vollständige Übernahme aus dem Modus „Pilot“ im Vergleich zu Übergängen aus „Assistent“ und „ACC“ eher zu verzögerten oder ausbleibenden Reaktionen führen. Gleiches gilt für Auffälligkeiten auf subjektiver und physiologischer Ebene. Mit Bezug zum Kapitel 4.2.4 wurde zudem postuliert, dass derartige Auswirkungen insbesondere in **unerwarteten, zeitkritischen Situationen** auftreten. Daher erfolgte die Betrachtung der Effekte in einer Kollisionssituation mit einem schwer vorhersehbaren Objekt auf der Fahrbahn. Lassen sich die angenommenen Unterschiede bestätigen, wäre eine vollständige Kontrollrückgabe aus höheren Automatisierungsstufen als kritisch zu betrachten.

Zur Beantwortung der Frage, gingen die Daten der Modusgruppe „Pilot“ ( $N = 20$ ), „Assistent“ ( $N = 20$ ) und „ACC“ ( $N = 20$ ) in die Varianzanalysen ein. Im Fokus standen die Transitionen auf „Fahrer selbst“ (vgl. Abbildung 71), welche nach Auswirkungen des „Grads der Kontrollverschiebung“ und des Zeitpunkts des Übergangs auf „FS“ (Reihenfolgeeffekt) untersucht wurden. Für die Versuchsfahrten erfolgte erneut die Annahme eines linearen Zusammenhangs.

Die Ergebnisdarstellung beginnt wiederum mit den Befunden aus der Analyse der Fahrdaten. Die darin betrachtete **Übernahmedauer** als Maß für die Zeit, welche die Probanden von der Übernahmeaufforderung des Systems bis zur ersten Reaktion benötigten (vgl. Tabelle 28), ergab weder für die „Versuchsfahrt“ ( $F[2, 114] = 0.51, p = .604; \eta^2 = .009$ ) noch für die Interaktion zum „Grad der Kontrollverschiebung“ ( $F[4, 114] = 0.75, p = .563; \eta^2 = .025$ ) signifikante Effekte. Es zeigte sich ausschließlich für den Zwischensubjektfaktor ein Unterschied ( $F[2, 57] = 25.62, p < .000; \eta^2 = .473$ ). Demgemäß reagierten die Probanden mit Übergang „Pilot-FS“ langsamer ( $p < .000$ ) auf die Übernahmeaufforderung ( $M = 1.55, SD = 0.21$ ) als Fahrer mit geringerem „Grad der Kontrollverschiebung“ („ACC-FS“:  $M = 1.10$ ; „Assistent-FS“:  $M = 1.16$ ).

Als erste Reaktion wurde dabei derjenige Zeitpunkt gewählt, an dem die Fahrer Längsverzögerungen unter  $-1 \text{ m/s}^2$  aufwiesen. Hintergrund dessen war, dass die Probanden in der relativ schlecht vorhersehbaren Kollisionssituation mit einem Reh auf der Fahrbahn (vgl. Abbildung 69) immer zuerst bremsen und dann lenkten. Jene Reaktionen auf das per Trigger ausgelöste Übernahmesignal ist in Abbildung 93, vom Wegpunkt 0m ausgehend, dargestellt. Hieraus geht zusätzlich hervor, dass die Probanden mit der Transition „ACC-FS“ am frühesten die Fahrspur wechselten (ungefähr 125 m vor dem Reh). Danach folgten diejenigen Personen, die vorab „Assistent“ gefahren sind (ca. 112 m vor dem Reh). Testteilnehmer, welche von „Pilot“ auf „FS“ übergingen, lenkten am spätesten ein (ca. 100 m vor dem Reh) und fuhren auch am dichtesten am Reh vorbei.

An der ersten deutlichen Veränderung des Lenkradwinkels nach der Transition ist weiterhin ablesbar, dass die Probanden mit der Transition „ACC-FS“ den geringsten Lenkradwinkel beim 1. Gegenlenken nach dem Fahrstreifenwechsel stellten ( $4,5^\circ$ ). Sie führten demnach im Vergleich zu den anderen beiden Gruppen das Ausweichmanöver harmonischer durch. Die Maxima der Fahrer, deren Fahrzeugführung vor dem Übergang durch den „Assistenten“ bzw. „Piloten“ übernommen wurde, sind hingegen deutlich nach links verschoben und weisen eine stärkerer Überhöhung des Lenkradwinkels auf („Assistent-FS“ =  $12,5^\circ$ ; „Pilot-FS“ =  $10^\circ$ ). Gleichzeitig verzögerten die Testpersonen mit dem Übergang „Pilot-FS“ am stärksten ( $-5,8 \text{ m/s}^2$ ).

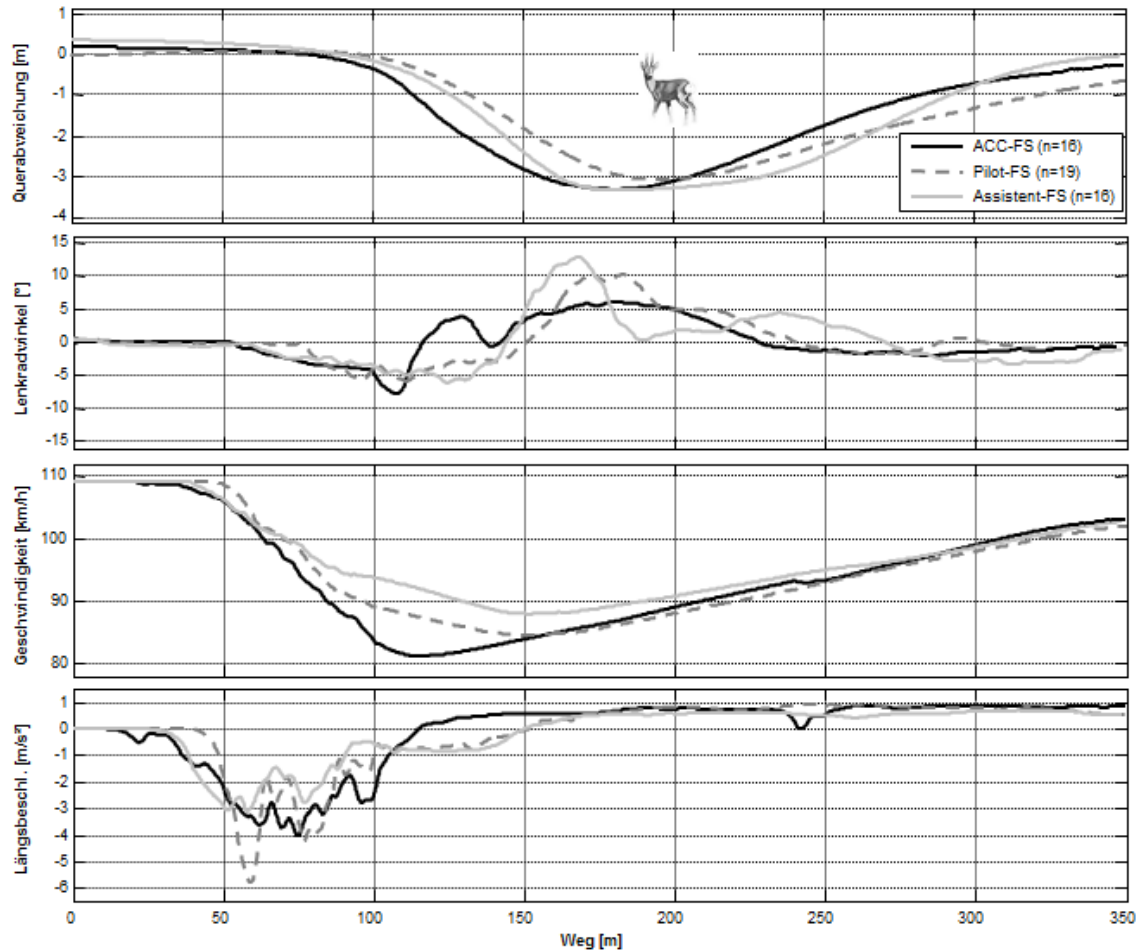


Abbildung 93: Verlauf der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen für Kontrollverschiebungen aus „ACC“ „Assistent“ und „Pilot“ auf „Fahrer selbst“ (FS)

Obwohl die zunehmende Entbindung des Fahrers aus dem Regelkreis „Fahrer-Fahrzeug-Straße“ hypothesenkonform mit höheren Anforderungen an die Übernahme der Fahrzeugkontrolle einhergeht und besonders beim Modus „Pilot“ verzögerte sowie stärkere Reaktionen verursachte, kollidierte interessanterweise keiner der Probanden mit dem Reh. Dabei ist zu beachten, dass dies auch in der vierten Versuchsfahrt (ca. nach 55 min) der Fall war.

Die Transition in der relativ plötzlichen und unvorhersehbaren Situation ging zudem modusunabhängig ( $F[2, 45] = 0.50, p = .612; \eta^2 = .022$ ) mit positiven **Bewertungen auf subjektiver Ebene** einher. So gaben alle Testpersonen unabhängig von der Versuchsfahrt ( $F[2, 45] = 0.62, p = .545; \eta^2 = .027$ ) an, schnell auf die Übernahmeaufforderung reagiert zu haben ( $M_{ACC-FS} = 9.70; M_{Assistent-FS} = 10.60; M_{Pilot-FS} = 9.90$ ). Sie empfanden den Systemvorschlag als transparent ( $M_{ACC-FS} = 10.60; M_{Assistent-FS} = 11.15; M_{Pilot-FS} = 11.80$ ) und haben gut verstanden, was sie nach dem Übergang tun sollen ( $M_{ACC-FS} = 10.37; M_{Assistent-FS} = 10.32; M_{Pilot-FS} = 11.56$ ). Obwohl die Situation selbst als „störend“ bezeichnet wurde ( $M = 8.09; SD = 3.13$ ), haben sich alle Fahrer gut in die Rolle des Fahrzeugführers zurückversetzt

gefühl (M<sub>ACC-FS</sub> = 11.65; M<sub>Assistent-FS</sub> = 11.89; M<sub>Pilot-FS</sub> = 11.50). 13 Probanden äußerten in dem Zusammenhang spontan, dass sie in der Situation erwarten, die komplette Kontrolle über das Fahrzeug zurückzuerhalten. Sie gingen intuitiv davon aus, dass dies ein Grenzfall für das System ist.

Ein vergleichbares Bild ergab sich bei der Analyse der **biophysiologicalen Daten**. Die Betrachtung der ausgewählten, **elektrodermalen Parameter** „Amplitudengröße“ und der „Erholungszeit“ führte weder beim Faktor „Versuchsfahrt“ ( $F[2, 38] = 0.21, p = .812; \eta^2 = .011$ ) noch beim „Grad der Kontrollverschiebung“ ( $F[2, 38] = 2.17, p = .120; \eta^2 = .103$ ) zu signifikanten Effekten. Es zeigte sich gleichfalls keine Interaktion (vgl. Anhang).

Analog zu den vorhergehenden Erkenntnissen (vgl. Kapitel 6.5.1) fiel auf, dass die Erholungszeit für die Hautleitfähigkeitsreaktion nach der Transition relativ lange dauerte und eine große Varianz in den Daten aufwies (vgl. Abbildung 94, links). Die Reaktion auf die Transition baute sich folglich nur sehr langsam und interindividuell unterschiedlich ab. Sie spiegelt gleichfalls die erhöhte Beanspruchung der Fahrer in der Übernahme-situation wider. Gleiches galt für die Amplitudengröße (vgl. Abbildung 94, rechts), welche wertemäßig ein Niveau erreichte, das in vorausgehenden Analysen (vgl. Kapitel 6.5.1) auf eine erhöhte Beanspruchung der Fahrer hindeutete.

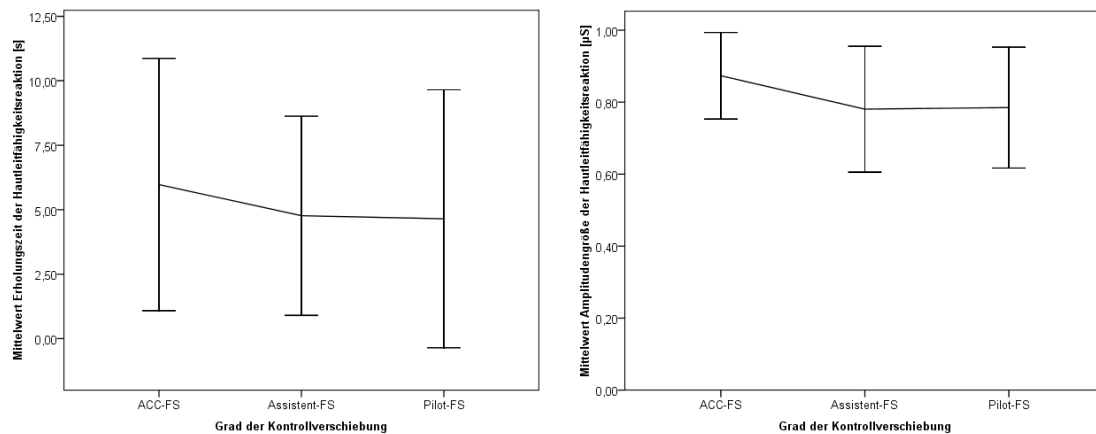


Abbildung 94: Erholungszeit (M, SD; links) und Amplitudengröße (M, SD; rechts) der Hautleitfähigkeitsreaktion für Kontrollverschiebungen aus „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ auf „Fahrer selbst“

In Referenz zu den bereits dargestellten Ergebnissen bestätigte die varianzanalytische Auswertung der **Blickdaten** ebenso, dass die Testpersonen unabhängig von der „Versuchsfahrt“ und dem „Grad der Kontrollverschiebung“ gleich lange auf die Systemzustandsanzeige schauten (vgl. Anhang). Dies galt besonders für den ersten Blick auf das Display nach der Übernahmeaufforderung, der zumeist auch den letzten Blick ausmachte („Versuchsfahrt“:

$F[2, 33] = 1.09$ ,  $p = .353$ ;  $\eta^2 = .061$ ; „Grad der Kontrollverschiebung“:  $F[2, 33] = 0.17$ ,  $p = .846$ ;  $\eta^2 = .010$ ). Die Probanden schauten demnach nur einmal auf die Anzeige und konzentrierten sich danach auf die Fahrsituation. Ein zweiter Blick wurde nur beim Übergang „ACC-FS“ ( $N = 4$  von 16 Fällen) und „Assistent-FS“ ( $N = 3$  von 13) aufgewendet.

Die Analyse der **Videos** zeigte darüber hinaus keine Auffälligkeiten im Verhalten der Probanden, die in Richtung Mode Confusion interpretierbar sind. Alle Testpersonen übernahmen vollständig die Fahrzeugkontrolle und waren sich dieser auch bewusst.

Den Abschluss der Auswertung bildeten erneut **Korrelationsanalysen** nach Pearson, um ein globales Bild über die einzelnen Zusammenhänge zwischen den betrachteten Variablen zu erhalten. Diese zeigten bezüglich der Aktivierungsdauer eine gering ausgeprägte, negative Korrelation zur bewerteten Kontrollierbarkeit der Situation ( $r[55] = -0.39$ ,  $p = .003$ ) sowie zur Amplitudengröße ( $r[51] = -0.29$ ,  $p = .040$ ). Gleichzeitig hing die wahrgenommene Schnelligkeit der Reaktion und die subjektive Transparenz der Übernahmeaufforderung positiv zusammen ( $r[60] = 0.48$ ,  $p < .000$ ). Das eingeschätzte Ausmaß des Rückversatzes in die Fahrzeugführungsrolle korrelierte negativ mit beiden Parametern ( $r[59]_{\text{Schnelligkeit}} = -0.30$ ,  $p = .023$ ;  $r[59]_{\text{Transparenz}} = -0.26$ ,  $p = .045$ ). Da zudem der erste Blick auf die Systemzustandsanzeige zumeist der einzige war, ergaben sich zur Gesamtblickdauer abschließend sehr hohe Zusammenhänge ( $r[42] = 0.98$ ,  $p < .000$ ).

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse zur Auswirkung der Transitionsmerkmale „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Indirekte Transition“ auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion eingegangen. Im Vordergrund steht die Wechselwirkung der beiden Faktoren (vgl. Kapitel 6.2).

### **Grad der Kontrollverschiebung \* Indirekte Transition**

Zur Beantwortung der Frage, ob sich indirekte Transitionen auf die Zwischenstufe „ACC“ unterschiedlich aus dem Modus „Pilot“ und „Assistent“ heraus auswirken (vgl. Kapitel 6.2), wurden die Daten der Modusgruppe „Pilot“ ( $N = 20$ ) sowie „Assistent“ ( $N = 20$ ) inferenzstatistisch näher betrachtet. Analog zu den Erkenntnissen der ersten Studie war die Annahme, dass die indirekte Transition aus „Pilot“ im Vergleich zur vollständigen Deaktivierung der Funktion eher mit verzögerten Verhaltens- bzw. Blickreaktionen einhergeht und sich in subjektiven Angaben zur wahrgenommenen Transparenz des Übergangs sowie in der Stärke der physiologischen Reaktion ausdrückt (vgl. Tabelle 22). Im Unterschied dazu sollte die Transition „Assistent-ACC“ mit weniger deutlichen Effekten auf der Verhaltens- und der Bewertungsebene einhergehen.



Als Daten für den Übergang auf „FS“ wurden allerdings nicht die Werte aus der Reaktion auf das unerwartete und zeitkritische Ereignis gewählt (vgl. Abbildung 93). Diese repräsentieren eher eine Sondersituation, welche mit einer normalen Abschaltung der Funktion bei Erreichen einer Systemgrenze nicht vergleichbar sind. Zudem könnte sie zu systematischen Effekten in Referenz zum Übergang auf „ACC“ führen. Infolgedessen wurde hier diejenige Transitionssituation betrachtet, bei der die Fahrfunktion die Kontrolle aufgrund eines einscherenden Fahrzeugs an den Fahrer zurückgibt (vgl. Abbildung 68). Dabei ist beachten, dass der Fahrer ca. 3 s nach dieser Situation die Möglichkeit hatte, erneut einen höheren Automationsgrad zu aktivieren (vgl. Kapitel 6.3.2). Im vorliegenden Fall interessierte bei der Analyse der subjektiven Daten vor allem die Option, den Modus „ACC“ wieder einzuschalten. Hintergrund dessen ist die Frage, ob die Probanden den Übergang auf „ACC“ besser verstehen bzw. bewerten, wenn sie zunächst die komplette Kontrolle zurückerhalten und dann bewusst die Fahrfunktion aktivieren. Dies wäre für die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen eine wichtige Erkenntnis.

Unter Berücksichtigung des Versuchsdesigns (vgl. Abbildung 71) wurden erneut Varianzanalysen für die direkten bzw. indirekten Übergänge aus „Pilot“ und „Assistent“ gerechnet. Die Ergebnisdarstellung beginnt mit den Befunden aus der Auswertung der Fahr- und Fragebogendaten.

Diesbezüglich zeigte sich für **Übernahmedauer** als Maß für die Zeit, welche die Probanden von der Übernahmeaufforderung des Systems bis zur ersten Reaktion benötigten, die Verteilung in Abbildung 95 (links). Demgemäß ließ sich unabhängig von der Versuchsfahrt ein tendenzieller Interaktionseffekt belegen ( $F[1, 36] = 3.79, p = .059; \eta^2 = .095$ ). So gingen indirekte Transitionen auf die Zwischenstufe „ACC“ aus dem Modus „Pilot“ ( $M = 3.74, SD = 0.76$ ) im Vergleich zu „Assistent“ ( $M = 2.82, SD = 0.93$ ) mit höheren Reaktionszeiten einher ( $p = .025$ ). Dies galt nicht für die direkten Kontrollverschiebungen auf „Fahrer selbst“ ( $F[1, 18] = 0.14, p = .713; \eta^2 = .008$ ). Darüber hinaus ist die „Art des Übergangs“ innerhalb der Modusgruppe „Assistent“ ( $M_{\text{direkt}} = 2.52$  vs.  $M_{\text{indirekt}} = 2.82$ ) anscheinend weniger entscheidend als innerhalb der Gruppe „Pilot“ ( $M_{\text{direkt}} = 2.60$  vs.  $M_{\text{indirekt}} = 3.74$ ). So benötigen die Fahrer aus dem höheren Automationsgrad mehr Zeit für die Übernahme, wenn sie nicht mit einer vollständigen Kontrollabgabe einhergeht ( $p = .001$ ). Zudem zeigte sich, dass bei direkten Übergängen in Referenz zu indirekten generell schneller reagiert wurde ( $F[1, 38] = 9.12, p = .004; \eta^2 = .194$ ).

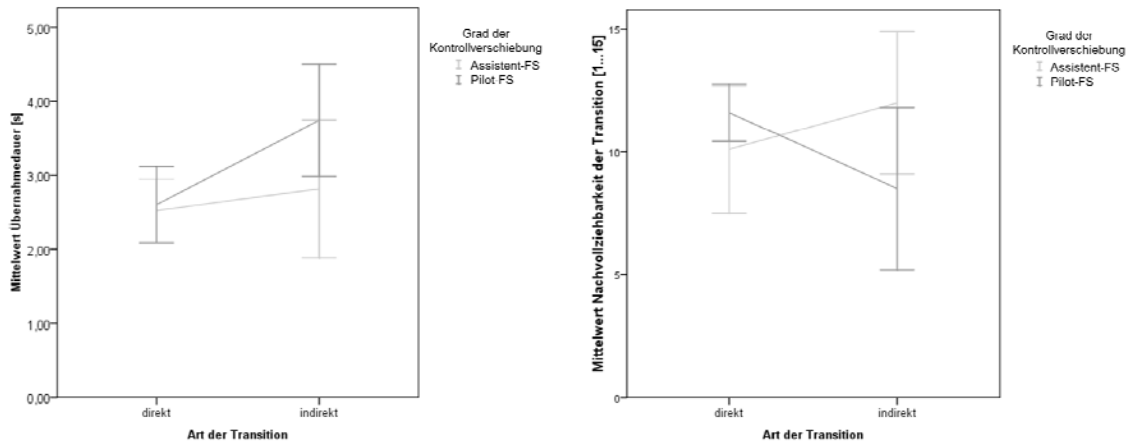


Abbildung 95: Wechselwirkungsdiagramm zwischen „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Art der Transition“ für die Variablen „Übernahmedauer“ (links) und „Nachvollziehbarkeit der Transition“ (rechts)

Begleitend dazu, ergab die Analyse der **subjektiven Daten** für die Variablen „Nachvollziehbarkeit der Transition“ (vgl. Abbildung 95, rechts) und „wahrgenommene Desorientierung“ (vgl. Abbildung 96, links) ein ähnliches Bild. Gemäß der doppelt disordinalen Interaktion, haben die Probanden beim Übergang „Pilot-FS“ ( $M = 11.60$ ,  $SD = 1.17$ ) im Vergleich zu „Pilot-ACC“ ( $M = 8.30$ ,  $SD = 3.31$ ) besser verstanden, was sie als nächstes tun müssen ( $F[1, 18] = 7.79$ ,  $p = .012$ ;  $\eta^2 = .302$ ) und fühlten sich bei der vollständigen Systemabschaltung weniger desorientiert ( $F[1, 18] = 17.31$ ,  $p = .001$ ;  $\eta^2 = .490$ ). Im Gegensatz dazu, zeigten sich bei der Modusgruppe „Assistent“ keine Unterschiede in der Nachvollziehbarkeit der Art der Transition ( $F[1, 18] = 2.37$ ,  $p = .141$ ;  $\eta^2 = .116$ ) und im Ausmaß der Desorientierung beim Übergang ( $F[1, 13] = 0.04$ ,  $p = .953$ ;  $\eta^2 = .000$ ). Beide Transitionen waren für die Versuchsteilnehmer einfach zu verstehen.

In Referenz zum Modus „Pilot“ bestehen demnach vor allem Schwierigkeiten im Bewusstsein für den aktuellen Systemzustand, wenn eine hochautomatisierte Fahrfunktion nur teilweise abgeschaltet wird. Ist der Fahrer noch anteilig in die Fahraufgabe eingebunden, fällt ihm dieser Übergang leichter ( $F[1, 17]_{\text{Nachvollziehbarkeit}} = 5.65$ ,  $p = .029$ ;  $\eta^2 = .250$ ;  $F[1, 17]_{\text{Desorientierung}} = 4.02$ ,  $p = .061$ ;  $\eta^2 = .191$ ). Hierbei ist interessant, dass die Option, den Modus „ACC“ erst nach einer vollständigen Systemabschaltung aktivieren zu können (vgl. Kapitel 6.3.2), ausschließlich von den Probanden der „Pilot-Gruppe“ positiv bewertet wurde ( $F[1, 18] = 59.51$ ,  $p < .000$ ;  $\eta^2 = .768$ ; vgl. Abbildung 96, rechts). Die Testteilnehmer mit Übergang aus „Assistent“ bewerteten beide Möglichkeiten ähnlich neutral ( $M_{\text{direkt}} = 7.60$  vs.  $M_{\text{indirekt}} = 7.90$ ).

Ein Effekt der Versuchsfahrt ließ sich für alle durchgeführten Berechnungen nicht nachweisen (siehe Anhang).

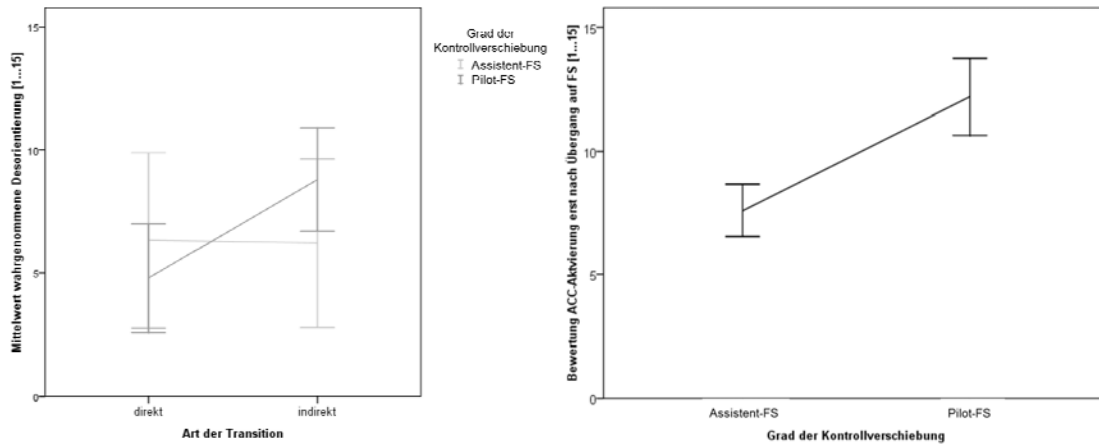


Abbildung 96: Wahrgenommene Desorientierung ( $M$ ,  $SD$ ) in Abhängigkeit der „Art der Transition“ und des „Grads der Kontrollverschiebung“ (links) sowie Bewertung der Option ( $M$ ,  $SD$ ) einer ACC-Aktivierung nach vorausgehender Kontrollabgabe aus „Assistent bzw. „Pilot“ auf „Fahrer selbst“

Die Analyse der **biophysiologicalen Daten**, welche sich auf die Auswertung der **elektrodermalen Parameter** „Amplitudengröße“ und der „Erholungszeit“ bezog, konnte keine derartigen Interaktionseffekte auflösen ( $F[1, 36]_{\text{Amplitudengröße}} = 0.21$ ,  $p = .648$ ;  $\eta^2 = .006$ ;  $F[1, 36]_{\text{Erholungszeit}} = 0.288$ ,  $p = .595$ ;  $\eta^2 = .008$ ). Es zeigte sich nur bezüglich des „Grads der Kontrollverschiebung“, dass Übergänge aus dem Modus „Pilot“ ( $M = 0.75$ ,  $SD = 0.26$ ) im Vergleich zu „Assistent“ ( $M = 0.52$ ,  $SD = 0.33$ ) mit einer größeren Amplitude der Hautleitfähigkeitsreaktion einhergehen ( $F[1, 38] = 6.22$ ,  $p = .017$ ;  $\eta^2 = .141$ ). Sie scheinen den Fahrer demnach stärker zu beanspruchen. Dies ließ sich jedoch anhand der subjektiven Daten zur wahrgenommenen Beanspruchung nicht nachweisen ( $F[1, 18] = 1.29$ ,  $p = .268$ ;  $\eta^2 = .056$ ). Mit Bezug zu den vorhergehenden Erkenntnissen, scheinen die Parameter der Hautleitfähigkeit daher in Übernahme-situationen weniger gut zur Betrachtung differentieller Auswirkungen von unterschiedlichen Transitionen geeignet zu sein.

Dafür untermauerte die abschließende Analyse der **Blickdaten** den angenommenen Interaktionseffekt zwischen der „Art der Transition“ und dem „Grad der Kontrollverschiebung“. Dies galt für die Dauer des ersten Blicks auf die Systemzustandsanzeige ( $F[1, 36] = 14.96$ ,  $p < .000$ ;  $\eta^2 = .294$ ) und für die mittlere Gesamtblickdauer ( $F[1, 35] = 5.27$ ,  $p = .028$ ;  $\eta^2 = .131$ ). Gemäß Abbildung 97 schauten die Probanden mit direktem Übergang signifikant kürzer auf das Modusdisplay ( $p_{1. \text{Blick}} = 0.01$ ;  $p_{\text{Gesamt}} < .000$ ) als bei der indirekten

Transition auf „ACC“. Dieser Unterschied ließ sich nicht für die „Assistent-Gruppe“ bestätigen und entspricht damit den bisherigen Erkenntnissen ( $F[1, 18]_{1. \text{ Blick}} = 2.32, p = .145; \eta^2 = .114; F[1, 18]_{\text{Gesamt}} = 0.19, p = .667; \eta^2 = .011$ ).

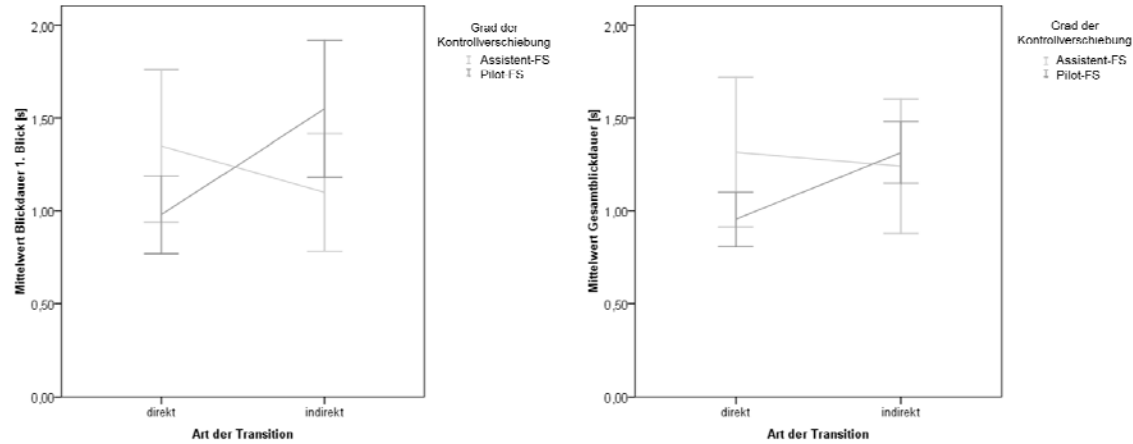


Abbildung 97: Wechselwirkungsdiagramme zwischen „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Art der Transition“ für die Variablen „Blickdauer (1. Blick; links)“ und Gesamt-blickdauer (rechts)

Auffällig war zudem, dass ausschließlich bei der vollständigen Deaktivierung des Modus „Pilot“ kein zweiter Blick auf die Systemzustandsanzeige gerichtet wurde. Anscheinend erwarteten die Testpersonen eine derartige Transition aus der hochautomatischen Fahrfunktion heraus und benötigen keine weiteren Informationen zum aktuellen Systemstatus.

Die Sichtung der **Videodaten** zeigte darüber hinaus keine Auffälligkeiten im Verhalten der Probanden, die in Richtung Mode Confusion oder im Sinne versuchsfahrtabhängiger Einflüsse interpretierbar sind.

Den Abschluss dieses Ergebnisteils bilden erneut **Korrelationsanalysen** nach Pearson zur Identifizierung der Zusammenhänge zwischen den betrachteten Variablen. Demgemäß gingen erneut nur diejenigen Parameter ein, die zu signifikanten Unterschieden geführt haben. Es zeigte sich, dass die Übernahmedauer eine gering ausgeprägte, positive Korrelation zur Option der ACC-Aktivierung nach vollständiger Kontrollrückgabe aufwies ( $r[40] = 0.33, p = .035$ ). Die Nachvollziehbarkeit der Transition hing negativ mit der wahrgenommenen Desorientierung ( $r[35] = -0.52, p = .001$ ), dem ersten Blick ( $r[40] = -0.40, p = .012$ ) und der Gesamtblickdauer ( $r[39] = -0.37, p = .019$ ) auf die Systemzustandsanzeige zusammen. Weiterhin korrelierte das Ausmaß der Desorientierung positiv mit dem ersten

Blick auf die Modusanzeige ( $r[35] = 0.39$ ,  $p = .020$ ). Die Dauer des ersten Blicks bestimmte gleichzeitig primär die Gesamtblickdauer ( $r[39] = 0.83$ ,  $p < .000$ ).

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse zur Auswirkung des Transitionsmerkmals „Ähnlichkeit von Systemmodi“ innerhalb des mehrstufigen Automationsansatzes eingegangen. Im Vordergrund steht dabei die Wahrscheinlichkeit der Verwechslung der Modi „Assistent“ und „Pilot“ bei gleichzeitiger Verfügbarkeit im Fahrzeug.

### **Ähnlichkeit von Systemmodi**

Zur Beantwortung der Frage, ob sich Transitionen zwischen einander sehr ähnlichen Systemmodi negativ auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion auswirken (vgl. Kapitel 6.2), wurden die Daten der Gruppe „Pilot“ näher betrachtet ( $N = 20$ ). Der Fokus lag hierbei auf denjenigen Übergängen, die mit einer Transition auf den Modus „Assistent“ einhergingen (vgl. Abbildung 71). Vergleichend dazu erfolgte der Einbezug der vollständigen Deaktivierung des hochautomatisierten Systems gemäß dem Sonderanwendungsfall aus Abbildung 68. Damit verbunden wurde erneut geprüft, wie die Option, den Modus „Assistent“ erst nach der kompletten Kontrollrückgabe zu aktivieren, von den Probanden wahrgenommen wird. Übergreifend bestand die Annahme darin, dass die gleichzeitige Verfügbarkeit von funktional einander ähnlichen Systemen im Fahrzeug mit höherer Wahrscheinlichkeit zum Auftreten von Mode Confusion bzw. Mode Errors führt. Dies sollte sich in verzögerten Verhaltens- bzw. Blickreaktionen, subjektiven Angaben zur Intransparenz des Übergangs und in stärkeren, physiologischen Orientierungsreaktionen zeigen (vgl. Tabelle 22).

Die statistische Auswertung der objektiven und subjektiven Daten erfolgte analog zum Versuchsdesign (vgl. Abbildung 71) mittels multivariater Varianzanalyse mit Messwiederholung.

Bei der Analyse der **Übernahmedauer** ergab sich, dass sich die Probanden nicht in der Zeit unterschieden, welche sie von der Übernahmeaufforderung des Systems bis zur ersten Reaktion benötigten (vgl. Anhang). Allerdings fiel auf, dass bei der Transition „Pilot-Assistent“ zwei Testpersonen (VP 1, VP 51) auffällige Verläufe in der Fahrer- und Fahrzeugreaktion nach der Übernahme zeigten (vgl. Abbildung 98).

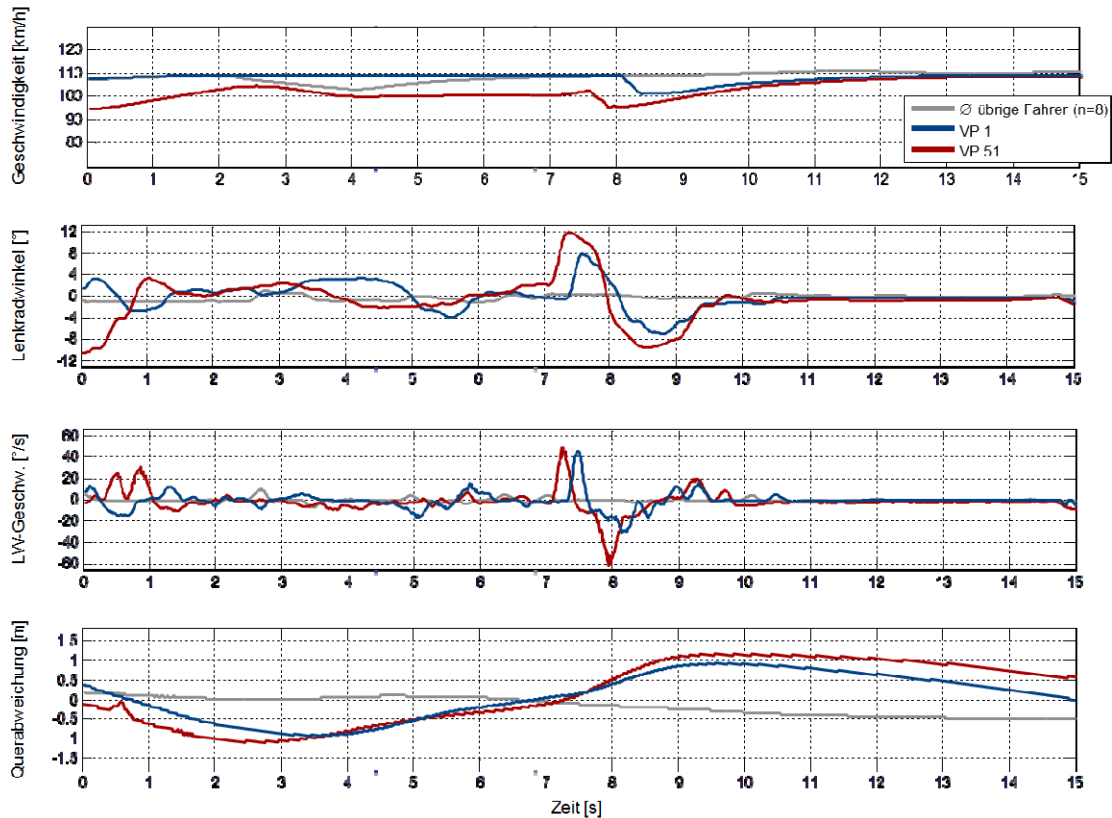


Abbildung 98: Verlauf der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen für die Transition „Pilot-Assistent“ (Zeitpunkt 0 = Übernahmeaufforderung) über alle Versuchsfahrten hinweg

Mit Bezug zu vorhergehenden Erkenntnissen (vgl. Kapitel 6.5.1), deuten die Verläufe in Abbildung 98 auf eine **Modusverwechslung** hin, welche sich vor allem in einer regelungsbedingten Abweichung von der Fahrspur ausdrückt. Die Probanden haben den Unterschied der zwei Systeme in der Fahrspurhaltung nicht verstanden.

Interessant ist in dem Zusammenhang, dass sich eine derartige Modusverwechslung mit einhergehendem „error of commission“ ebenfalls bei denjenigen Versuchsteilnehmern bestätigen ließ, welche aus dem Modus „Pilot“ zunächst eine vollständige Kontrollrückgabe erlebten und danach die Funktion „Assistent“ aktivierten (Transition: Pilot-FS-Assistent). So zeigten hier drei von zehn Probanden (VP 4, VP5, VP 39) ein vergleichbar markantes Fahrverhalten nach der Bestätigung des Systemangebots (vgl. Abbildung 99).

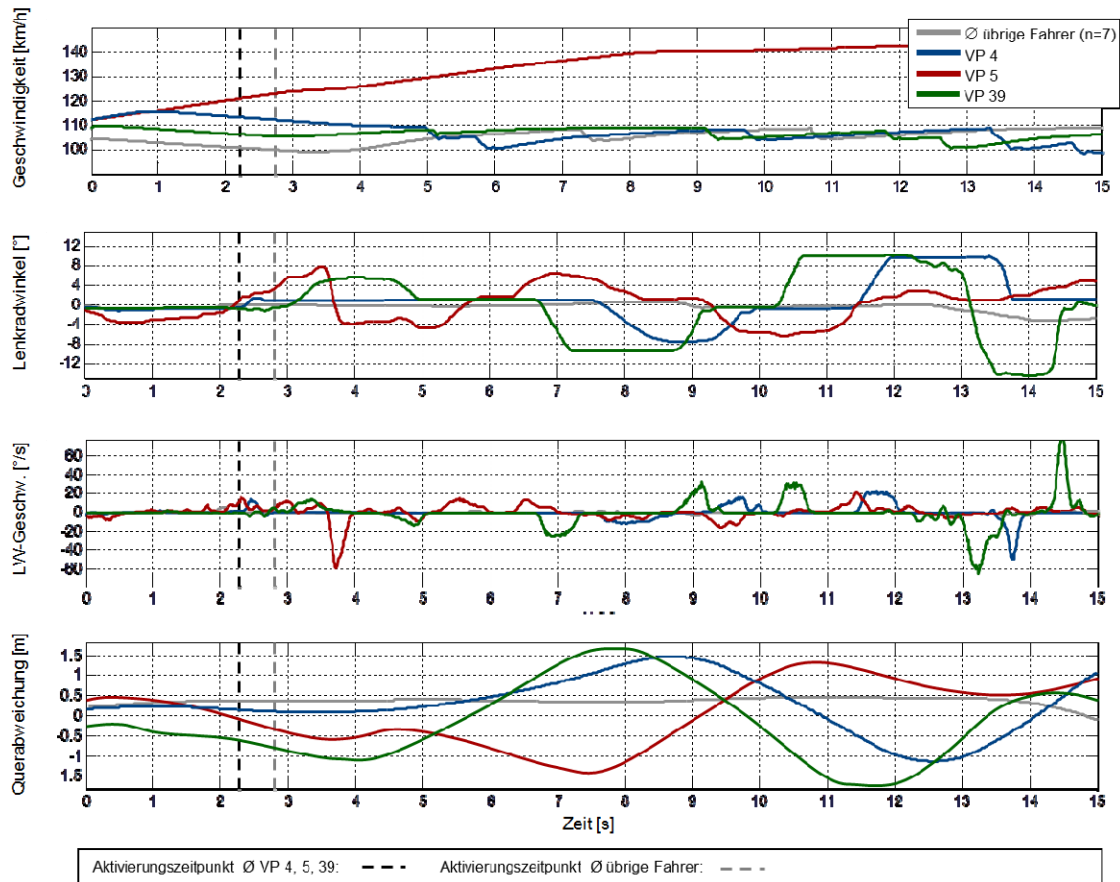


Abbildung 99: Verlauf der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen für die Transition „FS-Assistent“ (Zeitpunkt 0 = Systemangebot) nach vorheriger Kontrollrückgabe aus „Pilot“

Dieses Verhalten scheint durch die kognitive Fehlannahme, den „Piloten“ einzuschalten, bedingt gewesen zu sein und führte zu einer Wegnahme der Hände vom Lenkrad. Zudem konnte analog zu den Verläufen der Abbildungen 83 und 88 festgestellt werden, dass die „auffälligen“ Testpersonen in Referenz zu den übrigen Fahrern das Systemangebot im Mittel 0,5 s früher bestätigten ( $M_{VP4, 5, 39, 68} = 2.3 \text{ s}$  vs.  $M_{VP\text{Rest}} = 2.8 \text{ s}$ , vgl. Abbildung 99). Anscheinend spielen hierbei erneut Top-Down-Prozesse in der Informationsverarbeitung des Fahrers eine wichtige Rolle, die zu erwartungsbasierten Handlungen führen und in kognitiven Annahmen über Systemzustände sowie deren Erreichung begründet sind.

Die Ergebnisse aus der Fahrdatenanalyse unterstreichen somit, dass die gleichzeitige Verfügbarkeit von einander sehr ähnlichen Systemen im Fahrzeug zu „Automation Surprises“ führt. Das betrifft vor allem Übergangsphasen, in denen der Fahrer vor der Aktivierung die beiden Systeme differenzieren muss. Damit verbunden kann in Übernamesituationen eine kurzfristige Kontrollrückgabe an den Fahrer das Auftreten von Mode Confusion nicht

verhindern. Die Fahrer können trotzdem Schwierigkeiten haben, die Modi voneinander zu unterscheiden.

Ein ähnliches Bild ergab sich bei der näheren Betrachtung der **subjektiven Daten**. So ließen sich hier bei der „Nachvollziehbarkeit der Transition“ tendenzielle ( $F[1, 14] = 3.49, p = .073; \eta^2 = .199$ ) und bei der „wahrgenommenen Desorientierung“ hochsignifikante ( $F[1, 14] = 36.22, p < .000; \eta^2 = .727$ ) Unterschiede bestätigen (vgl. Abbildung 100).

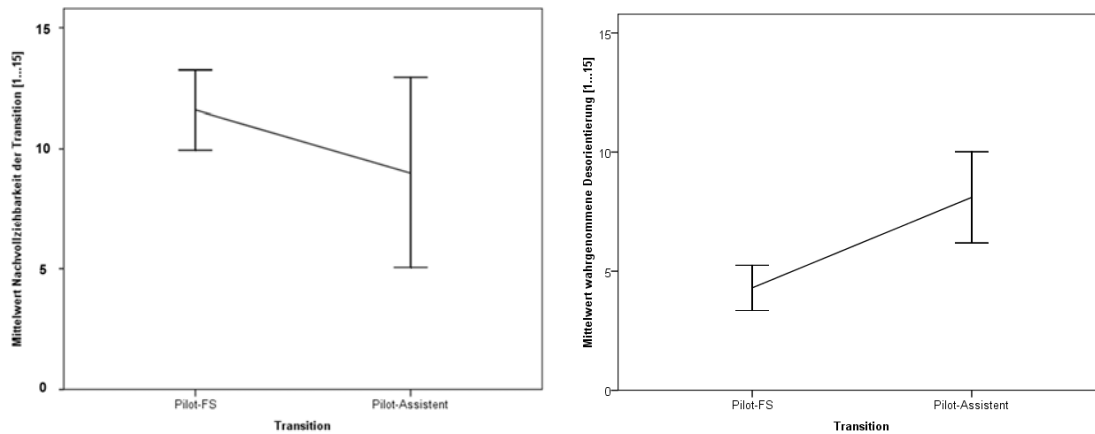


Abbildung 100: Nachvollziehbarkeit der Transition ( $M, SD$ , links) und wahrgenommene Desorientierung ( $M, SD$ , rechts) für Übergänge aus „Pilot“ in „Fahrer selbst“ und „Assistent“

Für die Probanden mit Übergang „Pilot-FS“ im Vergleich zu „Pilot-Assistent“ war die Transition gemäß Abbildung 100 transparenter ( $M_{\text{Pilot-FS}} = 11.50$  vs.  $M_{\text{Pilot-Assistent}} = 9.03$ ) und sie gaben an, weniger verwirrt bei der Übernahme zu sein ( $M_{\text{Pilot-FS}} = 4.33$  vs.  $M_{\text{Pilot-Assistent}} = 8.03$ ). Interessant ist, dass sich zwar fünf von zehn Versuchsteilnehmern mit Übergang auf „Assistent“ anschließend eine vollständige Rückgabe auf „Fahrer selbst“ vor der Systemaktivierung wünschten, sich jedoch alle Testpersonen ( $N = 20$ ) unsicher darüber waren, ob diese Gestaltung der Transition zu einem besseren Verständnis des Modus führt. Diesbezüglich zeigte sich zudem in den Versuchsleiterprotokollen, dass die Fahrer häufig nachfragten, was den „Assistenten“ vom „Piloten“ unterscheidet. Sie äußerten ebenfalls, dass ihnen nach dem Übergang oft nicht ausreichend bewusst war, was die Fahrfunktion genau macht. Dies schien auch mit der Darstellung in der Systemmodusanzeige zusammenzuhängen, welche den Probanden nicht aussagekräftig genug war ( $N = 3$ ). Darüber hinaus merkte eine Versuchsperson an, dass das moderate Übernahmesignal nicht zum Übergang auf „Assistent“ passte.



Die **biophysiologische Auswertung** der Daten konnte keine derartigen Effekte auflösen (vgl. Anhang). Die **elektrodermalen Parameter** „Amplitudengröße“ sowie „Erholungszeit“ wiesen jedoch erneut versuchsfahrt- und transitionsunabhängig relativ hohe Werte auf (Amplitudengröße:  $M = 0.88$ , Erholungszeit:  $M = 3.99$ ). Mit Bezug zu Kapitel 6.5.1 erreichten sie ein Niveau, welches in vorausgehenden Analysen auf eine erhöhte Beanspruchung der Fahrer hindeutete. Übernahme-situationen stellen somit im Vergleich zu Systemaktivierungen eine andere Kategorie von Fahrsituationen dar, in denen biophysiologische Parameter weniger gut zur differentiellen Betrachtung von Transitionsauswirkungen geeignet sind.

Dafür untermauerte die abschließende Analyse der **Blickdaten**, dass der Übergang aus „Pilot“ in „Assistent“ im Vergleich zur vollständigen Kontrollrückgabe mit längeren Blicken auf die Systemzustandsanzeige einherging ( $F[1, 14] = 10.02$ ,  $p = .007$ ;  $\eta^2 = .417$ ). So schauten die Probanden mit Übernahmeaufforderung auf „FS“ kürzer ( $M_{\text{Pilot-FS}} = 1.01$ ,  $SD_{\text{Pilot-FS}} = 0.35$  vs.  $M_{\text{Pilot-Assistent}} = 1.60$ ,  $SD_{\text{Pilot-Assistent}} = 0.40$ ) und nur einmal auf das Modusdisplay (vgl. Abbildung 101, links). Von den Testpersonen mit der Transition „Pilot-Assistent“ schauten drei Fahrer ein zweites Mal auf die Systemzustandsanzeige (vgl. Abbildung 101, rechts). Zwei davon entsprechen denjenigen Probanden, die in der Fahrdatenanalyse ein auffälliges Verhalten nach dem Übergang zeigten (vgl. Abbildung 98). Da die Gesamtblickdauer primär durch den ersten Blick auf die Systemzustandsanzeige bedingt war, zeigten sich diesbezüglich ebenfalls signifikante Effekte in der gleicher Richtung ( $F[1, 14] = 9.25$ ,  $p = .009$ ;  $\eta^2 = .398$ ).

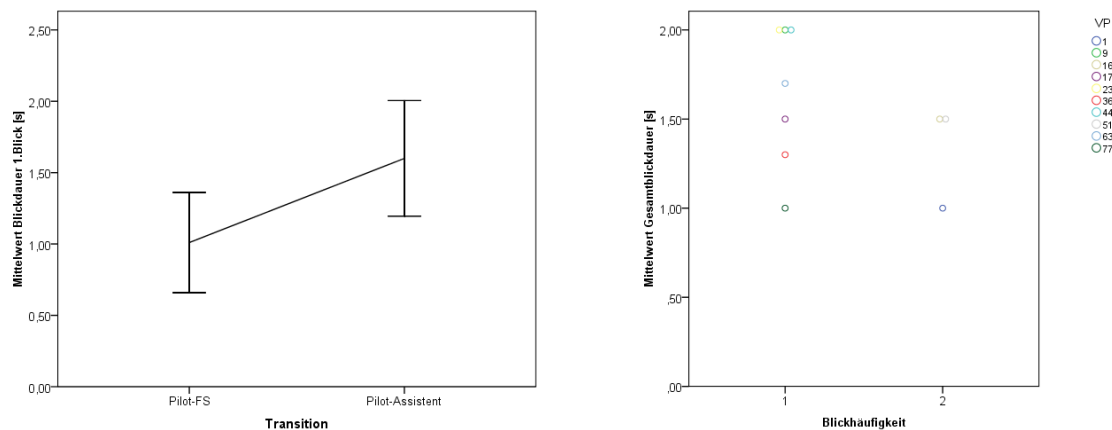


Abbildung 101: Dauer 1. Blick auf die Systemzustandsanzeige ( $M$ ,  $SD$ ) für Übergänge aus „Pilot“ in „Assistent“ bzw. „FS“ (links) und Häufigkeit der Blicke für „Pilot-Assistent“ in Abhängigkeit zur Gesamtblickdauer (rechts)

In Ergänzung zu den Blickdaten bestätigte die Analyse der **Videos** nochmals, dass die Probanden mit der Nummer 1 und 51 aufgrund der **Modusverwechslung** nach der Übernahmeaufforderung die Lenkung nicht richtig übernommen haben (vgl. auch Abbildung 98).

Gleiches ergab sich bei denjenigen Versuchspersonen, die nach der vollständigen Kontrollrückgabe den Modus „Assistent“ bewusst aktivierten und ein auffälliges Fahrverhalten zeigten (vgl. Abbildung 99). So versuchten die Fahrer mit den Nummern 4, 5 und 39 immer wieder, die Hände vom Lenkrad zu nehmen und wunderten sich über das „Schlingern“ des Fahrzeugs in der Fahrspur.

Die abschließende Untersuchung der **korrelativen Beziehungen** führte auf der Grundlage von Produkt-Moment-Korrelationen nach Pearson zu folgenden, signifikanten Zusammenhängen zwischen den erhobenen Daten (vgl. Tabelle 37). Dabei ist zu berücksichtigen, dass wiederum nur auf diejenigen Variablen eingegangen wird, welche in der vorangegangenen Auswertung zu signifikanten Effekten führten.

Tabelle 37: Signifikante Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten (summierter Wert)

	Nachvollziehbarkeit der Transition	Wahrgenommene Desorientierung	Dauer 1. Blick	Gesamtblickdauer
Nachvollziehbarkeit der Transition	1,000	-,796**	-	-,494*
Wahrgenommene Desorientierung	-,796**	1,000	,627**	,692**
Dauer 1. Blick	-	,627**	1,000	,973**
Gesamtblickdauer	-,494*	,692**	,973**	1,000

\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

\*\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

### 6.5.2.1 Zwischenfazit: Transitionen in Richtung Fahrer

In der Fahrsimulatorstudie wurden Transitionssituationen betrachtet, welche gemäß des Ansatzes der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 4.2) die Merkmale „Grad der Kontrollverschiebung“, „Indirekte Transition“, „Ähnlichkeit von Systemmodi“ und „Richtung der Transition“ abbilden. Für die Deaktivierung unterschiedlicher Grade an Automation galt es zudem zu prüfen, wie sich die Übergänge in zeitkritischen Situationen auswirken, die der Fahrer nicht erwartet. Demgemäß wurde postuliert, dass der Grad der Kontrollverschiebung stärker ins Gewicht fällt, wenn der Fahrer schnell und unvorhergesehen reagieren muss. Darüber hinaus erfolgte die Annahme, dass „indirekte Transitionen“ auf die Zwischenstufe „ACC“ aus der teilautomatischen Fahrt besser verstanden werden (vgl. Tabelle 22). Ein Übergang aus der hochautomatischen „Pilot-Funktion“ sollte hingegen mit verzögerten Verhaltens- bzw. Blickreaktionen verbunden sein, sich in subjektiven Angaben zur Intransparenz niederschlagen und auf physiologischer Ebene zu stärkeren Orientierungsreaktionen führen. Bezüglich der funktionalen „Ähnlichkeit von Systemmodi“ galt es weiterhin zu prüfen, ob Übergänge zwischen funktional ähnlichen Systemen auch in Deaktivierungsphasen zum Auftreten von

Mode Confusion bzw. Mode Errors führen. Interessant war dabei die Frage, ob sich durch eine vorausgehende, vollständige Kontrollrückgabe mit anschließender, bewusster Aktivierung des Modus „Assistent“ Einbußen im Systembewusstsein minimieren lassen.

Aus den Ergebnissen der Übergabesituationen in Richtung Fahrer lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- **Grad der Kontrollverschiebung:**

Gemäß der Annahme bedingt ein zunehmender „Grad der Kontrollverschiebung“ in Richtung Fahrer zeitlich verzögerte und stärkere Fahrerreaktionen in unvorhersehbaren Kollisionssituationen. Eine vorausgehende, assistierte Fahrt führt ferner eher zu einem harmonischeren Ausweichmanöver. Allerdings ist zu beachten, dass trotz des späteren Reaktionszeitpunktes und der Stärke der Reaktion in keinem Automationsgrad Kollisionen verzeichnet werden konnten. Dies galt auch nach längerer Fahrdauer im jeweiligen Modus. Die Übernahme-situation war somit für alle Probanden kontrollierbar und spiegelt eher generelle Automationseffekte anstelle von Einbußen im Modusbewusstsein wider. Dementsprechend empfanden alle Testpersonen die Transition als transparent, reagierten subjektiv ausreichend schnell und haben gewusst, welche Handlung von ihnen gefordert wird. Obwohl die Übernahme-situation als störend eingestuft wurde, fühlten sie sich modusunabhängig gut in die Rolle des Fahrers zurückversetzt und erwarteten diese Art des Übergangs. Da sich zudem auf elektrodermaler Ebene keine Unterschiede zwischen dem „Grad der Kontrollverschiebung“ nachweisen ließen, kann die Übernahme der Fahrzeugkontrolle mit einem fertigkeit-basierten Verhaltensmuster verglichen werden, welches nach reflexartigen Reiz-Reaktions-Mechanismen erfolgt. Dies könnte bewirken, dass die betrachteten Parameter weniger gut zwischen den Modi differenzieren. Das gilt ebenfalls für die Analyse des Blickverhaltens, nach welcher alle Probanden gleich lange auf die Systemzustandsanzeige nach der Übernahmeaufforderung schauten. Die Kenngröße zeigt jedoch auch, dass die Fahrsituation im Allgemeinen stärkere Anforderungen an den Fahrer stellte. So schauten die Probanden hier nur einmal auf die Anzeige und konzentrierten sich danach auf das Ausweichmanöver. Gleichfalls erreichten die elektrodermalen Größen der Hautleitfähigkeitsreaktion Werte, die niveaumäßig für ein erhöhtes Arousal sprechen.

- **Grad der Kontrollverschiebung \* Indirekte Transition**

Die angenommene Wechselwirkung der Merkmale „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Indirekte Transition“ kann auf Basis der Fahrverhaltens-, Blick- und Fragebo-

gendaten bestätigt werden. Demgemäß gingen „indirekte Transitionen“ auf die Zwischenstufe „ACC“ aus dem Modus „Pilot“ im Vergleich zu „Assistent“ mit längeren Reaktionszeiten einher. Detailbetrachtungen zeigten zudem, dass die Fahrer aus dem höheren Automationsgrad mehr Zeit für die Übernahme benötigten, wenn sie nicht mit einer vollständigen Kontrollabgabe verbunden war. Interessant ist in dem Zusammenhang, dass sich die Art der Transition aus dem Modus „Assistent“ auf der Verhaltensebene nicht unterscheidet. Demnach ist sowohl die vollständige Systemabschaltung als auch die Teilrückgabe der Kontrolle aus „Assistent“ für den Fahrer handhabbar. Gleiches bestätigt sich ebenfalls in den subjektiven Daten. So bestehen hier Einbußen in der Nachvollziehbarkeit des Übergangs und des Bewusstseins für den aktuellen Systemmodus nur für indirekte Kontrollverschiebungen aus „Pilot“. Die Fahrer blickten zudem länger auf die Systemzustandsanzeige, wenn die hochautomatische Fahrfunktion nicht vollständig ausgeschaltet wird. Hierbei ist interessant, dass die Option, den Modus „ACC“ erst nach einer vollständigen Systemabschaltung aktivieren zu können, ausschließlich von den Probanden der Pilot-Gruppe positiv bewertet wurde. Keine Unterschiede konnten hingegen in der Amplitudengröße und Erholungszeit der Hautleitfähigkeitsreaktion gefunden werden. Möglicherweise differenziert die elektrodermale Aktivität in Übernahmephasen nicht so stark zwischen den Bedingungen als in Aktivierungssituationen. Sie spiegelte hier ausschließlich ein erhöhtes Arousal-Niveau der Fahrer wider.

- **Ähnlichkeit von Systemmodi**

Übergänge von „Pilot“ in den funktional ähnlichen Modus „Assistent“ führen im Vergleich zu vollständigen Kontrollrückgaben zu Einbußen im Bewusstsein über den aktuellen Systemzustand. So reagierten die Testpersonen zwar vergleichbar schnell, empfanden die Transition jedoch weniger nachvollziehbar und fühlten sich desorientierter bei der Übernahme. Sie schauten zudem länger auf die Systemzustandsanzeige. Anhand der Fahr- und Videodaten konnten darüber hinaus zwei Probanden identifiziert werden, bei denen Mode Confusion auftrat. Interessant ist dabei, dass eine vollständige Kontrollrückgabe mit anschließender, bewusster Aktivierung des Modus „Assistent“ derartige Phänomene nicht verhinderte. Drei von zehn Testteilnehmern nahmen aufgrund der kognitiven Fehlannahme einer „Pilotfunktion“ dennoch die Hände von Lenkrad. Analog zu den vorausgehenden Erkenntnissen, lösten die elektrodermalen Parameter diese Effekte nicht auf. Sie zeigten erneut nur ein erhöhtes Beanspruchungsniveau der Probanden in den Übernahmephasen.

- **Mode Confusion**

Innerhalb der Transitionen in Richtung Fahrer konnten nur beim Übergang in funktional einander ähnliche Systemmodi „Automation Surprises“ in Form von Verwechslungen der Funktionsausprägungen festgestellt werden. Dies äußerte sich bei 20 % der Probanden durch eine Wegnahme der Hände vom Lenkrad, in längeren Blickdauern auf die Systemzustandsanzeige und in Angaben zur Intransparenz des Übergangs. Eine optimierte Gestaltung der Kontrollübergabe durch eine vorausgehende Deaktivierung der Funktion, behob das Phänomen nicht. Die nachfolgende Aktivierung von „Assistent“ ging sogar bei 30 % der Versuchspersonen mit unangemessenen Handlungen in Form von „errors of commission“ einher. Erwartungsbasierte Verhaltensweisen bestimmen hier maßgeblich die Reaktionen und kognitiven Annahmen des Fahrers. Auffällig ist, dass es teilweise sehr lange dauert, bis den Fahrern der Fehler auffällt. Primäre Informationsquelle ist dabei eher das Fahrzeugverhalten und weniger die grafische Systemzustandsanzeige. Anhand dieser Ergebnisse sollte auf die gleichzeitige Verfügbarkeit von einander sehr ähnlichen Systemen im Fahrzeug verzichtet werden. Auch eine bewusste Aktivierung der Funktion verhindert derartige Einbußen im Modusbewusstsein nicht.

## **6.6 Zusammenfassendes Fazit**

Das übergeordnete Ziel der Simulatorstudie war, Erkenntnisse zur Gestaltung von Übernahme- und Übergabesituationen innerhalb unterschiedlich stark automatisierter Fahrfunktionen zu gewinnen, die gleichzeitig im Fahrzeug verfügbar sind. Die Bandbreite der untersuchten Funktionen umfasste die Ausprägungen „Fahrer selbst“, „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“, welche aufeinander aufbauende Systemmodi repräsentierten. Im Vordergrund der Studie stand die Frage, ob es Übergänge zwischen Fahrer und jenen Automationsgraden gibt, die für den Nutzer intransparent sind, von dessen Erwartungen abweichen oder sogar nicht intendierte Automationseffekte in Form von Mode Confusion bzw. Mode Errors hervorrufen. Hierfür wurden Transitionssituationen integriert, die mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für derartige Folgeerscheinungen einhergehen. Diese bezogen sich auf Übergänge, die sich im Grad der Kontrollverschiebung und der Direktheit der Transition unterschieden sowie die Richtung der Transition und die Ähnlichkeit der Systemmodi berücksichtigten. Sie wurden in einem statischen Fahrsimulator realisiert und anhand von 80 Probanden evaluiert.

Auf Basis der Ergebnisse kann für die betrachteten Merkmale von Transitionssituationen zwischen Fahrer und Automation (vgl. Abbildung 71 und Tabellen 23, 24) das zusammenfassende Zustandsdiagramm in Abbildung 102 abgeleitet werden. Es kennzeichnet innerhalb

des ausgewählten Automationsansatzes geeignete und eher ungeeignete Übergänge im Fahrkontext. Sie werden nachfolgend erläutert.

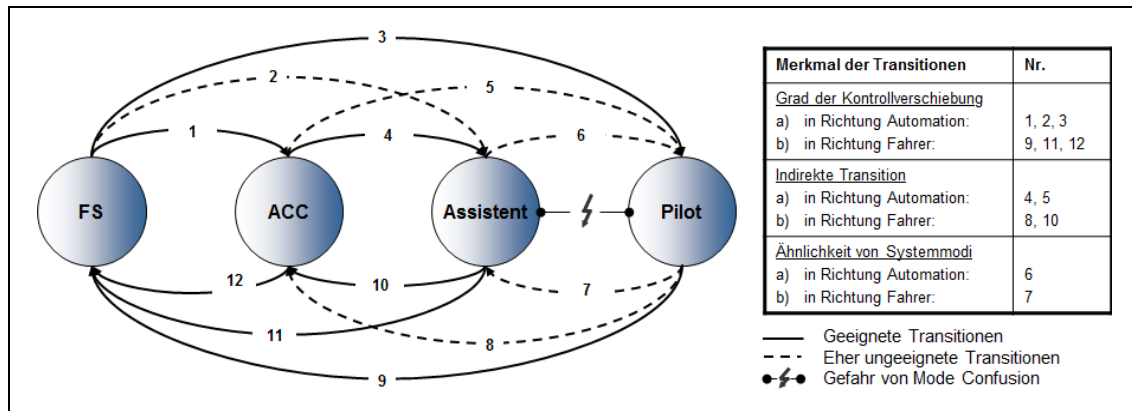


Abbildung 102: Gestaltungsempfehlungen für die betrachteten Übergabe- und Übernahme-situationen der zweiten Studie in Form eines Zustandsdiagramms

Gemäß Abbildung 102 kann auf der Grundlage von Fahr-, Blick-, Fragebogen- und biophysiologicalen Daten für **Transitionen in Richtung Automation** (vgl. Kapitel 6.5.1) empfohlen werden, den hochautomatisierten Modus „Pilot“ direkt und nicht über die Zwischenstufe „ACC“ zu aktivieren. Beim Modus „Assistent“ wirkt sich hingegen die schrittweise Einschaltung des teilautomatisierten Systems positiv auf das Verständnis der Nutzer aus (vgl. Kapitel 6.5.1). Diese Schlussfolgerung resultiert primär aus den Erkenntnissen zum **„Grad der Kontrollverschiebung“**. So bestätigte sich hier, dass der Fahrer bei der Aktivierung des Systemmodus „Assistent“ stärker gefordert wird, Teilfunktionen der Automation in Relation zur eigenen Rolle bei der Fahrzeugführung abzuschätzen (vgl. Tabelle 21). Demgemäß schalteten die Probanden das System zeitlich später als diejenigen Testpersonen ein, welche auf „ACC“ oder „Pilot“ übergingen. Zudem bewerteten sie die Transition als weniger gut nachvollziehbar und wünschten sich eine Aktivierung über Zwischenstufen der Automation. Der kognitive Aufwand bei der Differenzierung noch zu übernehmender Anteile der Fahraufgabe spiegelte sich weiterhin in biophysiologicalen Maßen und im Blickverhalten wider. So zeigten sich in den elektrodermalen Parametern Amplitudengröße und Erholungszeit der Hautleitfähigkeitsreaktion Muster, die auf eine veränderte Informationsverarbeitung mit verstärkter Orientierungsreaktion sowie Aktivität des Effort-Systems hinweisen (Boucsein, 1992). Begleitend dazu schauten die Testteilnehmer länger auf das Systemzustandsdisplay als Fahrer mit Übergängen in „ACC“ oder „Pilot“. In dem Zusammenhang fiel allerdings ebenfalls auf, dass das vermehrte Suchverhalten bzw. die Stärke der physiologischen Reaktion über die Anzahl der erlebten Transitionen abnahm und demgemäß vor allem in frühen Phasen der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion zu erwarten sind. Übergreifend sprechen die Erkenntnisse dafür, dass bei der Gestaltung von Übergabesituationen in

Richtung Automation weniger der Automationsgrad selbst entscheidend ist, sondern das Ausmaß der Entbindung des Fahrers aus der Fahraufgabe.

Analog dazu bestätigten die Wechselwirkungsanalysen zum „**Grad der Kontrollverschiebung\*Indirekte Transition**“, dass die Einschaltung eines Modus, bei dem der Fahrer noch Regelungsanteile hat, besser verstanden wird, wenn die Aktivierung schrittweise über Zwischenstufen der Automation erfolgt. Hingegen passt eine „Entweder-oder-Logik“ eher zum mentalen Modell des Nutzers, wenn die Fahrzeugkontrolle wie beim Modus „Pilot“ vollständig an das System abgegeben wird (vgl. Tabelle 22). Die Berücksichtigung dieser Kompatibilität zwischen Nutzer- und Systemmodell wirkt sich zudem insbesondere beim ersten Kontakt mit derartigen Fahrfunktionen positiv auf der Verhaltens- und Bewertungsebene in Übergabesituationen aus.

Darüber hinaus fiel auch auf, dass neben dem Entbindungsgrad auch die **Ähnlichkeit von Systemmodi** entscheidend für den Aufbau eines Systembewusstseins ist (vgl. Tabelle 21). Demgemäß geht mit der Aktivierung des Modus „Assistent“ eine allgemein höhere Beanspruchung in physiologischen und subjektiven Kenngrößen einher. Der kognitive Aufwand bei der Abgrenzung der Funktion zum System „Pilot“ äußert sich zudem in längeren Aktivierungsdauern, subjektiven Angaben zur erschwerten Nachvollziehbarkeit, einer verstärkten physiologischen Hautleitfähigkeitsreaktion und in längeren Blickdauern auf die Anzeige des aktuellen Systemzustands beim Übergang.

Die probandenseitigen Bedenken einer hohen Verwechslungswahrscheinlichkeit beider Fahrfunktionen wurden des Weiteren anhand von **Mode Confusion** in vier Fällen bestätigt. Die betroffenen Testpersonen nahmen hier fälschlicherweise in der Annahme, den Modus „Pilot“ zu aktivieren, die Hände vom Lenkrad („error of commission“). Die primär erwartungsgeleitete Verhaltensweise führte zudem zu einer inadäquaten Aufnahme von Informationen über die Statusanzeige und ging damit verbunden mit einer sehr schnellen Bestätigung des Funktionsangebotes einher. Kritisch daran ist weiterhin, dass es in der vorliegenden Studie teilweise sehr lange dauerte, bis den Fahrern der Handlungsfehler auffiel. Die entscheidende Feedbackgröße ist dabei das Fahrzeugverhalten gewesen und weniger das grafische Interface. Infolge der Auswirkungen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ist somit zu empfehlen, funktional ähnliche Systeme nicht gleichzeitig im Fahrzeug anzubieten. Die verfügbaren Automationsstufen sollten zudem zu den Erwartungen und kognitiven Modellen des Nutzers passen und nicht ausschließlich den technischen Weiterentwicklungsstand abbilden.

Betrachtet man ergänzend dazu die Ergebnisse zu **Transitionen in Richtung Fahrer** fällt zunächst auf, dass sich Übernahme-situationen von denen der Abgabe der Kontrolle an die Automation unterscheiden (vgl. Kapitel 6.5.2). Demgemäß bestimmen hier primär reflexartige Reiz-Reaktionsmechanismen die Verhaltensmuster. Jene bewirken, dass die betrachteten

Parameter weniger gut zwischen den einzelnen Modi und damit Merkmalen von Transitionssituationen differenzieren. So zeigen sich bezüglich des „**Grads der Kontrollverschiebung**“ mit Zunahme des vorausgehenden Automationslevels zwar zeitlich verzögerte und stärkere Fahrerreaktionen bei der Übernahme in unvorhersehbaren Fahrsituationen, jedoch gleichzeitig keine Kollisionsereignisse. Begleitend dazu empfanden alle Testpersonen die Transitionen als transparent, reagierten subjektiv ausreichend schnell und haben gewusst, welche Handlung von ihnen gefordert wird. Obwohl die Übernahme-situation als störend eingestuft wurde, fühlten sie sich zudem modusunabhängig gut in die Rolle des Fahrers zurückversetzt und erwarteten diese Art der Kontrollrückgabe. Weiterhin konnten keine Unterschiede auf physiologischer Ebene oder im Blickverhalten der Probanden gefunden werden. Es ergab sich ausschließlich ein erhöhtes Arousal-Niveau anhand der Parameter „Amplitudengröße“ und „Erholungszeit“ der Hautleitfähigkeitsreaktion. Folglich kann entgegen der Annahme (vgl. Tabelle 22) geschlussfolgert werden, dass eine vollständige Kontrollrückgabe aus höheren Automationsstufen auch nach längerer Fahrdauer kontrollierbar ist. Mögliche Einflüsse der Ablenkungswirkung von Nebenaufgaben oder Vigilanzeffekte bei zunehmender Daueraufmerksamkeit sind in dem Zusammenhang dennoch zu diskutieren (vgl. Kapitel 6.6).

Des Weiteren zeigt sich anhand der Erkenntnisse zur Wechselwirkung der Merkmale „**Grad der Kontrollverschiebung\*Indirekte Transition**“ dass Kontrollrückgaben auf Zwischenstufen der Automation durchaus negative Auswirkungen auf das Modusbewusstsein des Fahrers in Abhängigkeit des Automationsgrads haben können. So zeigte sich, dass indirekte Transitionen auf die Zwischenstufe „ACC“ aus dem Modus „Pilot“ mit längeren Reaktionszeiten einhergehen, weniger gut nachvollziehbar sind und zu längeren Blickdauern auf die Systemzustandsanzeige führen (vgl. hierzu Tabelle 22). Hingegen unterscheidet sich die Art der Transition aus dem Modus „Assistent“ weniger stark in den betrachteten Verhaltens- und Bewertungsparametern. Im Gegensatz zur hochautomatisierten Funktion, ist demnach sowohl die vollständige Systemabschaltung als auch die Teilrückgabe der Kontrolle aus „Assistent“ für den Fahrer handhabbar (vgl. Abbildung 102). Interessant ist in dem Zusammenhang, dass die teilweise erlebte Option, den Modus „ACC“ erst nach einer vollständigen Systemabschaltung aktivieren zu können, von den Probanden der „Pilot-Gruppe“ positiv bewertet wurde. Sie präferieren folglich nur aus der manuellen Fahrt heraus die bewusste Aktivierung eines neuen Automationsgrades. Dabei ist zu beachten, dass dies nur für die Funktion „ACC“ galt und nicht für den Modus „Assistent“. So konnten in jenem Fall sowohl bei der direkten Kontrollrückgabe auf „Assistent“ als auch bei der optionalen Aktivierung nach vorausgehender Ausschaltung des „Piloten“ Einbußen im Systembewusstsein nicht verhindert werden. Die **Ähnlichkeit der Systemmodi** führte auf subjektiver Ebene zu einer geringen Transparenz des Übergangs und einer starken Desorientierung der



Probanden bei der Übernahme. So schauten sie zum einen länger auf die Systemzustandsanzeige. Zum anderen trat bei 20 % der Testpersonen **Mode Confusion** bei der Transition von „Pilot“ auf „Assistent“ auf. Dies konnte auch nicht durch eine optimierte Gestaltung der Kontrollübergabe mit vorausgehender Deaktivierung der hochautomatischen Funktion behoben werden. Die nachfolgende Aktivierung von „Assistent“ ging hingegen sogar bei 30 % der Versuchspersonen mit unangemessenen Handlungen in Form von „errors of commission“ einher. Erwartungsbasierte Verhaltensweisen des Fahrers mit kognitiven Fehlanahmen zur aktivierten Funktion bestimmten hierbei erneut maßgeblich die Wegnahme der Hände vom Lenkrad. Dies zeigt, dass auf die gleichzeitige Verfügbarkeit von einander sehr ähnlichen Systemen im Fahrzeug verzichtet werden sollte. Jenes Merkmal scheint die wichtigste Stellgröße für das Auftreten von Automation Surprises in einem mehrstufigen Automationsansatz zu sein und wirkt sich vor allem in Aktivierungssituationen negativ auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion aus. Bei allen anderen betrachteten Transitionsmerkmalen geht es eher darum, über die Berücksichtigung der Erwartungen und mentalen Modelle der Nutzer transparente Übergangssituationen zu gestalten, welche in Abhängigkeit der Bandbreite an Funktionen zu einem angemessenen Modusbewusstsein im Fahrzeug führen.

Bezüglich der **übergreifenden Fragen** (vgl. Kapitel 6.2) ist auf Basis der Ergebnisse der Simulatorstudie zusammenfassbar, dass die Anzahl an Systemen, die der Fahrer in einem mehrstufigen Ansatz differenzieren kann, von der Funktion abhängt, die als maximale Endausprägung im Fahrzeug verfügbar ist. So scheint mit zunehmender Entbindung des Fahrers aus dem Kontrollloop eine „Entweder-oder-Verknüpfung“ der Funktionen transparenter und besser nachvollziehbar zu sein. Ist der Fahrer hingegen noch anteilig an der Fahraufgabe beteiligt, sind technische Zwischenstufen denkbar. Hierbei ist aber zu beachten, dass diese für den Nutzer eindeutig voneinander abgrenzbare Modi darstellen sollten. Sobald die Grenzen ineinander übergehen, ist von einer höheren Wahrscheinlichkeit für Mode Confusion auszugehen. Folglich kann der Fahrer die Hinzunahme einer querführenden Assistenz zu einem bereits in Längsrichtung regelnden System sehr gut differenzieren. Unterscheiden sich die Funktionen zusätzlich in ihrer Stärke oder Art der Unterstützung, wird der Nutzer Schwierigkeiten im Systemverständnis haben. Jene Intransparenzen lassen sich dann vor allem in Aktivierungssituationen anhand von verzögerten Fahrerreaktionen, in einem charakteristischen Blickverhalten auf die Systemzustandsanzeige und in subjektiven Bewertungen auflösen. Zudem kann anhand der Hautleitfähigkeit die verstärkte Aktivierung als eine Art Orientierungsreaktion nachgewiesen werden.

Im Unterschied dazu ermöglichen Übernahmesituationen vorwiegend auf der subjektiven Ebene eine Unterscheidung zwischen transparenten und intransparenten Übergängen. Da die Reaktionen primär auf fertigkeitsbasierten Mechanismen beruhen, differenzieren die

Fahrverhaltens- und Blickparameter nur in spezifischen Situationen. Insbesondere die elektrodermalen Größen können nur noch als globaler Indikator für das allgemeine Beanspruchungserleben dienen.

In Summe konnten in der Simulatoruntersuchung anhand der betrachteten Kenngrößen Ableitungen für die nutzerzentrierte Gestaltung von Übergabe- und Übernahme-situationen in dem hier definierten Automationsansatz getroffen werden. Diese decken sich überwiegend mit denen aus der Realfahrtstudie (vgl. Kapitel 5.5). Analog zum Luftfahrtbereich kristallisierte sich die „Ähnlichkeit von Systemmodi“ als zentral für die Vermeidung von Mode Confusion im Fahrkontext heraus. Welche Folgerungen aus den anderen Transitionsmerkmalen im direkten Vergleich zur Luftfahrt gezogen werden können, ist unter inhaltlichen und methodischen Gesichtspunkten zu diskutieren. Dies erfolgt im anschließenden Kapitel 7 mit Berücksichtigung der zugrundeliegenden Fragestellungen der Arbeit (vgl. Kapitel 4). Es wird dabei auf die Erkenntnisse aus beiden Untersuchungen (vgl. Kapitel 5 und 6) eingegangen.

## **7 Zusammenfassende Diskussion**

Dieses Kapitel fasst in Kurzform die theoriebasierte Ableitung des Schwerpunkts der vorliegenden Arbeit zusammen und weist zugehörige Untersuchungsansätze aus. Damit verbunden leitet es über die Fragestellungen zur inhaltlichen Diskussion der Ergebnisse über und beurteilt die durchgeführten Studien aus methodischer Sicht. Ein Fazit schließt den Abschnitt ab und gibt Anstöße für weiteren Forschungsbedarf (vgl. Kapitel 8).

### **Arbeitsschwerpunkt und Hintergründe**

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit der nutzerzentrierten Gestaltung von **Übergabe- und Übernahme-situationen im Fahrkontext**. Den Rahmen hierfür bildete ein vierstufiger Automationsansatz, der sich mit Blick auf die Weiterentwicklung aktueller Fahrerassistenzsysteme (vgl. Kapitel 2.1.2) vom manuellen über das assistierte, teilautomatisierte bis hin zum hochautomatisierten Fahren erstreckte (vgl. Kapitel 2.1.4). Er berücksichtigte somit einerseits den Übergang zu integrierten Systemauslegungen in Quer- und Längsrichtung des Fahrzeugs (vgl. Kapitel 2.1.5). Andererseits fokussierte die betrachtete Bandbreite an Fahrfunktionen die gleichzeitige Verfügbarkeit aufeinander aufbauender Assistenz- und Automatisierungssysteme (vgl. Kapitel 2.1.6). Damit einhergehend implizierte die Arbeit vielfältige Verschiebungen der Fahrzeugführungskontrolle zwischen Fahrer und Automation, welche in Abhängigkeit der Systemvoraussetzungen sowohl Aktivierungs- als auch Übernahme-situationen betreffen können (vgl. Kapitel 2.3). Im Kern dieser Transitionen stand die Frage, ob dem Fahrer zu jeder Zeit transparent ist, welches System gerade aktiv ist, was es genau tut und wie dessen Abhängigkeiten zu anderen Fahrfunktionen im Automationsansatz definiert sind (vgl. Kapitel 3.2). Der Fokus der Betrachtung lag somit auf dem Bewusstsein des Nutzers für den jeweiligen Systemmodus und auf der Analyse von dessen Grundvoraussetzungen (vgl. Kapitel 3.2.2). Damit zusammenhängend ging es auf der einen Seite um die Betrachtung von Inkompatibilitäten im mentalen Systemmodell des Nutzers, welche top-down gesteuert die Aufmerksamkeits- und Handlungsprozesse des Fahrers überlagern (vgl. Kapitel 3.2.3). Auf der anderen Seite lag das Augenmerk auf Übergangsszenarien, die mit Bezug zu Erkenntnissen aus der Automationsforschung mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer geminderten **Mode Awareness** führen und nicht intendierte Effekte wie Mode Confusion oder Mode Errors forcieren. Die vorliegende Arbeit adressierte diesbezüglich **vier Kernmerkmale von Transitionen**, die auf der Abwägung technischer sowie psychologischer Rahmenkriterien basierten (vgl. Kapitel 4.2.4):

- **Grad der Kontrollverschiebung:** betrifft die Weite der Transition und damit das Ausmaß an verfügbarem Automationsgrad

- **Indirekte Transition:** betrifft Übergänge auf Zwischenstufen des mehrstufigen Automationsansatzes und somit partielle Kontrollverschiebungen auf Teilfunktionen
- **Ähnlichkeit der Systemmodi:** betrifft Übergangssituationen zwischen einander funktional ähnlichen Systemen
- **Richtung der Transition:** betrifft Übergeben der Kontrolle an das System (Aktivierungsphase) und Übernahmen der Kontrolle durch den Fahrer (Deaktivierungsphase)

Sie wurden in der vorliegenden Arbeit auf fahrzeugspezifische Anwendungsfälle im Normalbetrieb und an Systemgrenzen übertragen. Wesentliche Grundlage hierfür waren der fokussierte Anwendungskontext einer **Autobahnfahrt** (vgl. Kapitel 4.2.3) und der für jeden Automationsgrad zugehörige Systemmodus (vgl. Kapitel 4.2.2). Die Bandbreite an Automation erstreckte sich dabei von einer Fahrt ohne Assistenz, über die Nutzung eines ACC, bis hin zu Systemauslegungen, die zusätzlich in der Querführung assistierten oder diese übernahmen. Sie führte zur Definition folgender Systemmodi und Kurzbezeichnungen:

- Manueller Modus: **Fahrer selbst** (FS)
- Assistierter Modus: **ACC**
- Teilautomatisierter Modus: **Assistent**
- Hochautomatisierter Modus: **Pilot**

Für die Analyse der Übergabe- und Übernahmeszenarien zwischen diesen Funktionsausprägungen orientierte sich die explorativ geprägte Arbeit an Fahrerverhaltens-, Fahrerzustands- sowie Fahrerbewertungsparametern. Für die vier Kernmerkmale von Transitionen wurde dabei geprüft, ob sich jene Parameter zur Identifizierung Mode Awareness relevanter Effekte eignen und Ableitungen für die Gestaltung der Übergänge im definierten Automationsansatz zulassen. Damit verbunden ergab sich eine Reihe übergeordneter Fragestellungen, die einerseits die **Komplexität** der verfügbaren Stufen an Automation und der damit verbundenen **Systemmodi** betrafen (vgl. Kapitel 4.1). Diesbezüglich wurde hinterfragt, ob der Fahrer verschiedene Grade an Automation unterscheiden kann und inwieweit die für ihn differenzierbare Bandbreite an Fahrfunktionen vom Grad der Einbindung seiner Person in die Fahraufgabe abhängt. Es war offen, ob die Kombination von Einzelfunktionen sowie geringfügig erweiterte Systemauslegungen das Verständnis seitens des Fahrers erschweren. Andererseits stand bezüglich der **Transitionen** das Bewusstsein des Fahrers über den jeweils aktiven Systemmodus im Vordergrund der Betrachtung (vgl. Kapitel 4.3). Ziel war es, Inkonsistenzen in der nutzerseitigen Wahrnehmung des Modus und dessen Eigenschaften in dafür sensitiven Übergangssituationen zu identifizieren. Diese Kernfragen mündeten in zwei empirische Untersuchungsansätze (vgl. Kapitel 5, 6).

### **Untersuchungsansätze**

Die erste Studie betraf eine **Realfahrt auf der Autobahn** ( $N = 20$ ), die in einem Wizard-of-Oz Fahrzeugs erfolgte (vgl. Kapitel 5.3.3). Mit Hilfe dieser Rapid Prototyping Methodik wurden Übergangssituationen umgesetzt, die drei der definierten **Transitionsmerkmale** umfassten (vgl. Kapitel 5.3.2): Richtung der Transition, Grad der Kontrollverschiebung und indirekte Transition. Die dafür notwendige Simulation der vier betrachteten Systemmodi erfolgte durch einen verdeckten Wizard im hinteren Bereich des Fahrzeugs (vgl. Kapitel 5.3.3). Die Transitionen selbst wurden an vorab definierten Streckenpunkten (vgl. Kapitel 5.3.4) gemäß dem Versuchsplan (vgl. Kapitel 5.3.5) und -ablauf (vgl. Kapitel 5.3.6) vom Wizard getriggert. Es erfolgte die Erhebung von Fahr-, Video- und Fragebogendaten.

Die zweite Studie fand in einem statischen **Fahrsimulator** statt ( $N = 80$ ). In Ergänzung zur Realfahrtstudie band sie das vierte Transitionsmerkmal „Ähnlichkeit von Systemmodi“ und den Systemmodus „ACC“ stärker in die Analysen ein (vgl. Kapitel 5.6). Ferner ermöglichte das Untersuchungssetting eine kontrollierte sowie ereignisgebundene Transitionsauslösung (vgl. Kapitel 6.3.3) und die Hinzunahme von biophysiological Parametern in der Datenbasis (vgl. Kapitel 6.4). Weiterhin adressierte die Studie eine größere Anzahl an Probanden (vgl. Kapitel 6.3.7), die zudem die Möglichkeit hatten, die einzelnen Systemmodi vor den Übergangssituationen länger zu nutzen. Wie bereits erwähnt, umfassten jene Übergänge alle vier definierten **Transitionsmerkmale** (vgl. Kapitel 6.3.2): Richtung der Transition, Grad der Kontrollverschiebung, indirekte Transition und Ähnlichkeit von Systemmodi. Zudem konnten im Fahrsimulator zeitkritische Situationen nachgebildet werden, in denen sich Einbußen im Modusbewusstsein besonders sensitiv niederschlagen (vgl. Kapitel 4.2.4). Die Simulation der vier betrachteten Systemmodi erfolgte über die Definition von Regelungsalgorithmen in Längs- und Querrichtung des Ego-Fahrzeugs (vgl. Kapitel 6.3.3). Die Transitionen selbst wurden in systemrelevanten Use Cases (vgl. Kapitel 6.3.4) gemäß dem Versuchsplan (vgl. Kapitel 6.3.5) und -ablauf (vgl. Kapitel 6.3.6) per XML Skript getriggert. Es erfolgte die Aufzeichnung von Fahr-, Video-, Fragebogen- und biophysiological Daten.

Inferenzstatistische Analysen führten zu den folgenden Erkenntnissen, welche die Fragestellungen beider Untersuchungen je nach Art des betrachteten Transitionsmerkmals zusammenfassen und inhaltlich sowie methodisch diskutieren.

### **Inhaltliche und methodische Ergebnisdiskussion**

Bezüglich des Transitionsmerkmals „**Grad der Kontrollverschiebung**“ adressierten beide Studien die Frage, ob bei Kontrollverschiebungen aus „Fahrer selbst“ in Richtung Automation der kognitive Aufwand bei der Differenzierung noch zu übernehmender Anteile der Fahraufgabe oder die „Weite“ der Transition die entscheidende Rolle für die Transparenz des Über-

gangs spielt. Demgemäß konnte in den empirischen Untersuchungen bestätigt werden, dass weniger das Ausmaß an erreichter Automatisierung einen Einfluss auf das Bewusstsein des Fahrers über den Systemmodus hat, sondern eher der kognitive Differenzierungsaufwand. So zeigte sich bei Transitionen in Richtung Automation, dass die Fahrer bei der Aktivierung des Modus „Assistent“ mehr Zeit benötigen, um sich ein Bewusstsein über die Funktionsaufteilung zwischen Fahrer und Automation zu verschaffen (vgl. Kapitel 6.5.1). Demgemäß schalteten die Probanden das System zeitlich später als diejenigen Testpersonen ein, welche auf „ACC“ oder „Pilot“ übergingen. Zudem bewerteten sie die Transition als weniger gut nachvollziehbar und wünschten sich eine Aktivierung über Zwischenstufen der Automation. Analog dazu wiesen die Fahrer in beiden Studien ein auffälliges Blickverhalten auf (vgl. Kapitel 6.5.1, 5.5.1). Sie orientierten sich beim Übergang auf „Assistent“ außergewöhnlich lang am Display mit den Systemzustandsanzeigen, bevor sie den Modus einschalteten. Begleitend dazu konnte auf biophysiologicaler Ebene eine verstärkte Orientierungsreaktion anhand der elektrodermalen Parameter „Amplitudengröße“ und „Erholungszeit“ der Hautleitfähigkeitsreaktion nachgewiesen werden (vgl. Kapitel 6.5.1). Trotz des höchsten Grads an Kontrollverschiebung ließen sich derartige Ergebnisse nicht bei Transitionen auf den Modus „Pilot“ belegen. Hier zeichnete sich eher eine spezifische Wahrnehmung der Funktion im Sinne einer „Entweder-oder-Logik“ ab. Verbunden mit dieser top-down-basierten Erwartung, passte die erlebte Art der Kontrollverschiebung zwischen der manuellen und pilotierten Fahrt somit zur mentalen Systemrepräsentation des Fahrers.

Kognitive Differenzierungsschwierigkeiten zeigten sich demnach nur beim Übergang auf den Modus „Assistent“. Hier spiegeln die erhaltenen Muster eine veränderte Informationsverarbeitung mit erhöhter Fahrerbeanspruchung wider (vgl. auch Boucsein, 1992). Obwohl die Testpersonen der vorliegenden Arbeit durchaus lernten, mit der direkten Aktivierung des Modus „Assistent“ umzugehen (vgl. Kapitel 6.5.1), benötigt das herauszubildende, fertigkeitsdeterminierte Wissen einen relativ hohen Zeitbedarf. Jener kann primär darauf zurückgeführt werden, dass der Fahrer direkt verstehen muss, welche Aufgaben der Fahrzeugführung er selbst und welche die Automation übernimmt. Dies scheint beim teilautomatisierten System „Assistent“ mit hohem Komplexitätsgrad der Funktion besonders schwierig zu sein. Gemäß Kapitel 3.2.3 sind die Ursachen dafür im Interface zwischen Nutzer und Maschine sowie im mentalen Systemmodell zu suchen. Diesbezüglich muss für den ersten Fall angemerkt werden, dass einige Probanden der zweiten Untersuchung die Modusanzeige nicht eindeutig genug empfanden ( $N = 3$  von 20). Es fehlten ihnen saliente Systeminformationen, die laut Erkenntnissen aus der Automationsforschung wichtig für eine adäquate Funktionsrückmeldung sind (Palmer, 1995; Sarter & Woods, 1995; Kolbig & Müller, 2013). Damit zusammenhängend fokussierte die vorliegende Arbeit ebenfalls keinen Multimodalitätsansatz in der Gestaltung des HMI, welcher das Modusbewusstsein positiv

beeinflussen kann (Hackenberg et al., 2013). Die primär visuelle Vermittlung des Systemmodus beinhaltete zudem keine konkreten Handlungsanweisungen an den Fahrer und verzichtete auf die Nutzung von fahrdynamischen Charakteristika zur Differenzierung der Bandbreite an verfügbaren Fahrfunktionen. Obwohl beide Ansätze Verbesserungspotentiale im Verständnis des Fahrers für die jeweilige Funktion versprechen (Petermann-Stock & Rhede, 2013; Lange et al., 2014), ist darüber hinaus davon auszugehen, dass der Grad der wahrgenommenen Einbindung in die Fahraufgabe die gewünschte Art und Weise der Systeminteraktion mitbestimmt hat. Demnach wird postuliert, dass die Einbettung des Modus „Assistent“ in das mentale Modell des Fahrers leichter fällt, wenn diese auf vorausgehende Assistenzsysteme aufsetzen kann. Damit verbunden sollte eine schrittweise Kontrollverschiebung auf teilautomatisierte Systeme besser zur mentalen Repräsentation der Funktion sowie deren Teilkomponenten passen.

Dies deckt sich mit den Erkenntnissen zum Transitionsmerkmal „**Indirekte Transition**“. So unterstützte die Nutzung der Zwischenstufe „ACC“ bei der Einschaltung des Modus „Assistent“ den Verständnisaufbau seitens des Fahrers. Sie führte zudem zu geringeren Aktivierungsdauern und tendenziell kürzeren Blickdauern auf die Systemzustandsanzeige (vgl. Kapitel 5.5.1, 6.5.1). Entgegen der aus der Luftfahrt abgeleiteten Annahme (vgl. Kapitel 4.2.4), erschweren indirekte Übergänge somit nicht ausschließlich die kognitive Differenzierungsfähigkeit von Systemen innerhalb eines mehrstufigen Automationsansatzes. Vielmehr scheint sich dieses Merkmal der Transition in Interaktion mit dem Grad der Kontrollverschiebung auch positiv auszuwirken. Demgemäß spielt es eine Rolle, welcher Modus mit einem indirekten Übergang aktiviert bzw. deaktiviert wird. Vergleichbare Ergebnisse finden sich bei Wimmer (2014). Hier wird ebenfalls eine hierarchische Aktivierung von Systemen betont, bei denen der Fahrer noch in den Regelkreis „Fahrer-Fahrzeug-Straße“ eingekoppelt ist.

Unter Bezugnahme der Erkenntnisse aus der vorliegenden Fahrsimulatoruntersuchung (vgl. Kapitel 6.5.2) scheint dies zudem auch für die Deaktivierungsphasen zu gelten. Obwohl indirekte Übergänge den Fahrer anscheinend stärker in der Differenzierung verbleibender Teilaufgaben der Fahrzeugführung fordern (vgl. Kapitel 5.5.2), führte hier sowohl die vollständige Systemabschaltung als auch die Teilrückgabe der Kontrolle aus „Assistent“ zu vergleichbaren Ergebnissen (vgl. Kapitel 6.5.2). Beide Arten von Übergängen waren für den Fahrer handhabbar. Allerdings bewirkt das Transitionsmerkmal nicht intendierte Verhaltens- und Bewertungseffekte bei Funktionen, die den Fahrer sehr stark aus der Fahraufgabe entbinden. In beiden Studien der vorliegenden Arbeit ergab sich diesbezüglich auf Basis der subjektiven Daten, dass indirekte Transition auf den Modus „Pilot“ im Vergleich zu „Assistent“ intransparenter sind (vgl. Kapitel 5.5.1, 6.5.1). Die Probanden sind sich nicht sicher,

welches System sie gerade aktivieren und benötigen mehr Zeit, um sich darüber bewusst zu werden. Gleiches galt für Übergänge aus „Pilot“ auf die Zwischenstufe „ACC“ (vgl. Kapitel 6.5.2). Längere Übernahmezeiten, andauernde Blicke auf die Systemzustandsanzeige und Einbußen in der subjektiven Nachvollziehbarkeit des Übergangs sowie im Bewusstsein für den aktuellen Systemmodus waren die Folge. Das Ergebnis zeigt, wie stark sich die mentale Repräsentation der hochautomatisierten Funktion im Sinne eines „On-Off-System“ auf die Interaktion in Übergangssituationen auswirkt. Fehlende Passungen zwischen der angenommen und der tatsächlich Verknüpfung des Systems erhöhen die kognitive Beanspruchung des Nutzers (Timpe, 1990) und schlagen sich direkt im Verhalten nieder (Degani & Heymann, 2000). Unter diesen Bedingungen kann die Wahrscheinlichkeit für Automation Surprises bei Transitionen mit partiellen Kontrollverschiebungen auf Teilfunktionen erhöht sein (Billings, 1997). Auch wenn dies in keiner der beiden Studien der Fall war und die Fahrer grundsätzlich Gewöhnungseffekte im Verlauf der Testfahrten zeigten (vgl. Kapitel 6.5.1), untermauern die Ergebnisse, dass mit zunehmenden Automatisierungsgrad die Funktionen innerhalb eines mehrstufigen Automationsansatzes direkter miteinander zu verknüpfen sind. Ähnliches bestätigten Erfahrungen aus der Luftfahrt mit „Shared-Control“ Systemen (Bredereke & Lankenau, 2002).

Zudem ist zu berücksichtigen, dass das herauszubildende, fertigkeitsdeterminierte Wissen stets einen relativ hohen Zeitbedarf benötigt. Jener liegt bei **Kontrollverschiebungen in dynamischen und teils zeitkritischen Situationen** im Straßenverkehr jedoch oft nicht vor (Flemisch, Vollrath & Rataj, 2007). Unvollständige Systemmodelle oder Defizite im Systembewusstsein sind deshalb zumeist in Szenarien abträglich, in denen schnelles Reagieren auf Unvorhergesehenes erfolgen soll (Kaber & Endsley, 1997; Sarter, Woods & Billings, 1997). Passt hingegen die Gestaltung der Übernahme zum mentalen Modell des Fahrers vom System, zeigt sich in der Simulatorstudie, dass vollständige Kontrollrückgaben aus höheren Automationsstufen auch nach längerer Fahrtdauer in Kollisionssituationen kontrollierbar sind (vgl. Kapitel 6.5.1). So ergaben sich mit Zunahme des vorausgehenden Automationslevels zwar zeitlich verzögerte und stärkere Fahrerreaktionen, jedoch konnten gleichzeitig keine Kollisionsereignisse festgestellt werden. Entgegen den Ergebnissen aus der Luftfahrt (vgl. Kapitel 4.2.4) empfanden selbst die Testpersonen mit Deaktivierung des Modus „Pilot“ diese Transitionen als transparent, reagierten subjektiv ausreichend schnell und haben gewusst, welche Handlung von ihnen gefordert wird. Die entscheidende Determinante scheint hier nicht wie angenommen der „Grad der Kontrollverschiebung“, sondern die Einhaltung der Auf- und Abwärtskompatibilität neuer Systeme gemäß den kognitiven Grundannahmen des Nutzers zu sein (Flemisch et al., 2007). So bewirkte die, mit der vollständigen Abschaltung einhergehende Passung zur „On-Off-Logik“ des Fahrers, ein angemessenes Verhalten in der



Kollisionssituation. Allerdings ist dabei zu beachten, dass die Erkenntnisse in einer simulierten Umgebung mit geringer externer Validität gewonnen wurden und sich aus Sicherheitsgründen nicht im Realverkehr (Studie 1) abbilden ließen. Zudem erfolgte in der zweiten Studie keine Berücksichtigung möglicher Ablenkungswirkungen von Nebenaufgaben (Petermann-Stock et al., 2013) oder von Vigilanzeffekten bei zunehmender Daueraufmerksamkeit (Othersen, Petermann-Stock & Vollrath, 2014). Des Weiteren geht mit einer zeitkritischen Übernahme der Kontrolle aus einer „Hands-off-Fahrt“ eine andere Dringlichkeit der Handlung einher. Jene bedingt schnellere Reaktionen, die sich ebenso in der ersten Studie bei den direkten Kontrollverschiebungen aus „Pilot“ auf „Fahrer selbst“ bestätigen ließen (vgl. Kapitel 5.5.2). Ferner ist zu beachten, dass gemäß der Definition der Automationsstufen der SAE (2014) derartige zeitkritische Szenarien bei einer hochautomatischen Fahrt nicht mehr auftreten. Dem Fahrer sollte mindestens ein Zeitfenster von zehn Sekunden für die Übernahme zur Verfügung stehen.

Darüber hinaus ist interessant, dass gleichfalls die Transition aus dem Modus „Assistent“ in beiden Untersuchungen für den Fahrer handhabbar war und zu keinen auffälligen Effekten auf der Verhaltens- bzw. Bewertungsebene führte. Übergreifend spricht dies zunächst dafür, dass ein vollständiges Ausschalten einer automatischen Funktion das Modusbewusstsein positiv beeinflussen kann. Gemäß der Argumentation von Anthony und Degani (1997) ist damit gewährleistet, dass sich der Fahrer nicht an einen zuletzt aktivierten Modus erinnern und alle Voraussetzungen für eine adäquate Antizipation des Systemverhaltens erfüllen muss. Er hat die volle Kontrolle über das Fahrzeug und kann sich bewusst für einen neuen Systemzustand entscheiden. Nutzt der Fahrer eine Fahrfunktion über einen längeren Zeitraum, scheint zudem eine hierarchische Kontrollverschiebung auf Teilfunktionen der Automation möglich zu sein. Derartige Übergabesituationen eignen sich jedoch nur für Systeme, die den Fahrer nicht vollständig aus der Fahraufgabe entbinden. So bestätigte die Simulatorstudie, dass für die Probanden der Übergang „Assistent-ACC“ gleichfalls transparent ist (vgl. Kapitel 6.5.2). In Referenz zur Realfahrtuntersuchung, welche nicht zu diesem Ergebnis kam (vgl. Kapitel 5.5.2), ist die Voraussetzung dafür das Kennenlernen des Systems und der damit verbundenen Wissensaneignung zur Funktionsweise. Dies war im realen Versuchsetting offenbar nicht ausreichend gewährleistet. Für die anfängliche Nutzung unterschiedlicher Automationsstufen in einem Fahrzeug ist daher die vollständige Kontrollverschiebung zurück auf den Fahrer zu empfehlen. Trotz der zusätzlich benötigten Bedienhandlung für die erneute Aktivierung eines System aus der manuellen Fahrt heraus, geht mit dieser Option eine positive Bewertung einher (vgl. Kapitel 6.5.2).

Zum anderen ist es laut den Erkenntnissen beider Untersuchungen essentiell, dass derjenige Modus, auf den die Kontrolle übergeben wird, klar und eindeutig vom vorausgehenden

Automationszustand trennbar ist. So führte die funktionale **Ähnlichkeit der Systemmodi** „Pilot“ und „Assistent“ zu Einbußen im Bewusstsein über das zu aktivierende System. Dies spiegelte sich bei der Transition „Assistent-Pilot“ in längeren Aktivierungs- sowie Blickdauern, höheren physiologischen Hautleitfähigkeitsreaktion und einer subjektiv geringeren Reaktionsschnelligkeit sowie Nachvollziehbarkeit des Übergangs wider (vgl. Kapitel 6.5.1). Gleichfalls empfanden die Testpersonen die analoge Transition in Richtung Fahrer („Pilot-Assistent“) weniger transparent und fühlten sich desorientierter bei der Übernahme im Vergleich zur vollständigen Kontrollabgabe (vgl. Kapitel 6.5.2). Obwohl aus methodischer Sicht weitere Vergleiche zwischen einander ähnlichen Funktionen fehlten bzw. in den Untersuchungen nur eine Referenz zum Übergang „FS“ gezogen wurde, scheint das Transitionsmerkmal ein wichtiges Kriterium für die Integration unterschiedlicher Fahrfunktionen ins Fahrzeug zu sein.

Dies ist besonders deshalb der Fall, da die Ähnlichkeit von Systemmodi analog zu den Erkenntnissen aus der Luftfahrt (vgl. Kapitel 4.2.4) sensitiv für **Mode Confusion** ist. So konnten die probandenseitigen Bedenken einer hohen Verwechslungswahrscheinlichkeit beider Fahrfunktionen in drei Fällen bei der Aktivierung sowie in zwei Fällen bei der Deaktivierung bestätigt werden. Die betroffenen Testpersonen nahmen hier fälschlicherweise die Hände vom Lenkrad („error of commission“), da die aktivierte Wissensstruktur und damit Verhaltensvorhersage dem „Pilot-Modus“ und nicht dem realen System entsprach. Die mangelnde Güte der Mode Awareness (Furukawa et al., 2003; Horiguchi, Fukuju & Sawaragi, 2006) führte zudem zu einer inadäquaten bzw. ausbleibenden Aufnahme von Informationen über die Statusanzeige („error of omission“). Es wurden nicht die richtigen Informationen gesucht (Dekker, 2006), sondern ohne Prüfung des Automationsmodus reagiert. Das bedeutet, dass die primär generalisierte Erwartung bzw. naive Annahme über den vorliegenden Systemzustand (Norman, 1983b; Kluwe & Haider, 1990; Rudin-Brown & Parker, 2004) nicht über das grafische Fahrzeuginterface allein auflösbar ist. Das Bewusstsein für die aktuelle Situation bildet sich erst nach der Übernahme heraus. Wichtig sind dabei vor allem kinästhetische Rückmeldungen des Fahrzeugs (Nirschl & Kopf, 1997; Landau & Weiße, 2001; Buld et al., 2002), an welchen sich die Probanden beider Untersuchungen stark orientierten. Interessant ist, dass die Fahrer zunächst versuchten, das Fahrzeug in seinem Regelungsverhalten zu korrigieren, bevor ihnen der Handlungsfehler bewusst wurde. Dies zeigt gleichfalls, wie änderungsresistent (Dutke, 1994), aufmerksamkeitsbindend (Hacker, 1996) und teilweise unlogisch (Norman, 1983b) mentale Repräsentationen sind. Darüber hinaus lassen sich die Auswirkungen des Transitionsmerkmals nicht einfach über gestalterische Maßnahmen lösen. So konnte eine vorausgehende, vollständige Kontrollrückgabe mit anschließender, bewusster Aktivierung des Modus „Assistent“ derartige

Phänomene nicht verhindern (vgl. Kapitel 6.5.2). 40 % der Versuchspersonen zeigte dennoch unangemessene Handlungen in Form von „errors of commission“. Allerdings waren die dokumentierten Automation Surprises nicht in allen Fällen an eine Transition zwischen den einander ähnlichen Systemmodi „Pilot“ und „Assistent“ gebunden. Die alleinige Verfügbarkeit dieser beiden Fahrfunktionen in einem „Fahrzeug“ bedingte in der Realfahrtstudie bei drei Probanden und im Simulator in einem weiteren Fall Mode Confusion. Damit geht mit diesem Merkmal eine generell höhere Wahrscheinlichkeit für derartige Phänomene einher. Im Gegensatz zum „Grad der Kontrollverschiebung“ und dem Kriterium „Indirekte Transition“ bestätigen sich hier deutlich die Erkenntnisse aus der Luftfahrt (vgl. Kapitel 4.2.4). So haben die ersten beiden Merkmale in Abhängigkeit des Ausmaßes an Entbindung des Fahrers von der Fahraufgabe zwar Einfluss auf die Mode Awareness, sie führen aber dennoch nicht zu vergleichbaren Folgen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion wie die „Ähnlichkeit von Systemmodi“. Letztere ist daher eine entscheidende Stellgröße für Automation Surprises im Fahrkontext. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich hier nicht wie bei den anderen Transitionsmerkmalen abzeichnete, dass Lerneffekte zu Anpassungen des mentalen Modells und damit der Mensch-Automatisierungs-Kompatibilität (Flemisch et al., 2008) führen könnten. Die potentiellen Auswirkungen scheinen eher eine generelle Einschränkung in der kognitiven Differenzierungsfähigkeit des Fahrers abzubilden, die auch bei bestehenden Systemen wie „Tempomat“ und „ACC“ zu bedenken sind (Petermann & Schlag, 2010). Auf Basis der durchgeführten Studien ist daher von der gleichzeitigen Verfügbarkeit aufeinander aufbauender Systeme mit ähnlichem Funktionsumfang abzuraten.

Ein wesentlicher Faktor beim Auftreten von Mode Confusion ist ebenso die **Richtung der Transition**. In Kombination mit der „Ähnlichkeit von Systemmodi“ innerhalb eines mehrstufigen Automationsansatzes tritt das Phänomen primär in Aktivierungssituationen auf. Entgegen Wickens (1996) zeigen sich somit Defizite im Bewusstsein über den aktuellen Systemzustand nicht nur in unerwarteten Situationen, in denen schnell reagiert werden muss, sondern auch bei der Aktivierung von Systemen, wo sich der Fahrer eigentlich Zeit lassen kann. Dabei wirkt sich vor allem das erwartungsbasierte Verhalten der Probanden mit Annahmen zum zukünftigen Systemmodus negativ aus. Resultat dessen waren in der Simulatorstudie teilweise sehr schnelle Bestätigungen von Funktionsangeboten (vgl. Kapitel 6.5.1), ohne sich bewusst vorher Feedback zur Automation zu holen. Das Ergebnis zeigt, wie wichtig es ist, nicht nur die Fähigkeit des Menschen zu betrachten, Systemausfälle oder Grenzsituationen zu beherrschen, sondern sich gleichfalls die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion in Aktivierungsphasen anzuschauen. Gemäß der Annahme dieser Arbeit ist dabei zu beachten, dass sich aufgrund des Zeitfensters für eine potentielle Fahrerreaktion Übergabe- von Übernahmeszenarien unterscheiden. So ist die Abgabe der Kontrolle viel stärker

an automatisierte, fertigkeitbasierte Verhaltensmuster gebunden (Rasmussen, 1983; Donges, 2009), die reflexartigen Reiz-Reaktions-Mechanismen folgt. Dies bewirkte in den vorliegenden Studien zum einen, dass bei der Abgabe der Kontrolle in Richtung Fahrer die intraindividuell stabilen Verhaltensmuster die erhaltenen Effekte des Automationsgrads und der Art des Übergangs beeinflussten. Zum anderen führte es dazu, dass die betrachteten Parameter unterschiedlich gut für die Beurteilung der Transitionsmerkmale auf der Verhaltens- sowie Bewertungsebene geeignet waren.

Mit Bezug zur Frage, anhand welcher Kenngrößen sich Einbußen im Modusbewusstsein auf objektiver und subjektiver Ebene im Fahrkontext abbilden lassen, können folgende Schlüsse für die **Eignung der betrachteten Kenngrößen** aus den beiden Studien gezogen werden. Dabei ist anzumerken, dass für eine endgültige Bewertung der Daten eine Regressionsanalyse erfolgen sollte, um die Beziehungen zwischen den abhängigen und unabhängigen Variablen exakt zu modellieren.

- Fahrverhaltensdaten: Die Definition der Parameter „Aktivierungs- und Übernahmedauer“ (vgl. Kapitel 5.4.2, 6.4.2) hat sich in beiden Studien grundsätzlich als sinnvoll erwiesen. So kann bei der Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion einerseits die Zeitdauer von der Verfügbarkeit des Systems bis zur Fahrerbestätigung genutzt werden, um anhand verzögerter oder auffällig schneller Reaktionen Schlüsse auf ein gemindertes Modusbewusstsein oder nicht passendes, mentales Nutzermodell zu ziehen. Analog zu Erkenntnissen zum Fahrerverhalten in Grenzsituationen oder bei Systemausfällen (z.B. Nilsson, 1995; Hogema et al., 1997; Fancher et al., 1998; Buld et al., 2002; Niederée & Vollrath, 2009; Vollrath, Briest & Oeltze, 2010), spiegelt sich demnach die erhöhte Beanspruchung und Aktivierung des Fahrers infolge des erwartungsinkonformen Systemzustands auch in jenen Phasen wider (Buld, Tietze & Krüger, 2005). Gleichzeitig deuten zu schnelle Reaktionen auf eine unzureichende Verarbeitung bzw. Interpretation notwendiger Systeminformationen hin (Woods et al., 1994). Sie waren in der Fahrsimulatorstudie mit dem Auftreten von Mode Errors verbunden. Voraussetzung für die Betrachtung der Aktivierungsdauer ist jedoch die Bedingung, dass die Probanden die Aufgabe haben, eine angebotene Funktion für die Aktivierung möglichst zeitnah zu bestätigen. Gleichfalls unterstützt eine begleitende Video- oder Blickverhaltensaufzeichnung die Analyse des Einschaltprozesses. Neben Markern für das Angebot und die Aktivierung, wurden in beiden Untersuchungen hier zusätzlich der Lenkradwinkel, die Längsbeschleunigung und die Querposition auf der Fahrspur als Bewertungskriterien herangezogen. Wichtig ist, dass nach der Systemaktivierung ein Datenausschnitt von ca. 12 s vorgehalten wird.

Dieser ermöglicht, Modusverwechslungen und dadurch bedingte Handlungsfehler anhand der lateralen sowie longitudinalen Größen zu visualisieren.

Bezüglich der Übernahmedauer als Maß für die Zeitspanne von einer Übernahmeaufforderung bis zur ersten Fahrerreaktion eignet sich ein vergleichbar langer Datenausschnitt zur Analyse der benannten Fahrzeugkennwerte. Auffällig war hier, dass bei Transitionen aus dem Modus „Pilot“ der Lenkradwinkel und aus „Assistent“ die Längsbeschleunigung erste, sichtbare Veränderungen abbildeten. Generell ließ sich anhand der Größen mit zunehmenden Automationsgrad eine zeitlich später einsetzende Reaktion nachweisen, die zu stärkeren (Kompensations-) Handlungen führte (vgl. Lindberg, Schaller & Gardenegger, 2007; Toffetti et al., 2009; Damböck et al., 2012). Allerdings fiel gleichzeitig auf, dass in Übernahmesituationen diese Kennwerte zur alleinigen Beurteilung von Einbußen im Modusbewusstsein nicht ausreichen. So zeigte sich, dass die Probanden mit der Transition „Pilot-FS“ zwar verzögert reagierten, die Übernahme selbst aber nicht als kritisch oder intransparent wahrgenommen haben. Das heißt, auf subjektiver Ebene fanden sich keine Unterschiede. Das objektive Reaktionsmaß ist daher stets in Relation zu weiteren Kenngrößen zu ziehen. Zudem ist zu beachten, dass das primär fertigkeitbasierte Fahrerverhalten in Übernahmesituationen (Rasmussen, 1983; Donges, 2009) mit relativ hoher, intraindividuelle Varianz nur unter spezifischen Bedingungen statistisch signifikante Effekte auflösen kann.

- Videodaten: Bezüglich der Eignung von Videodaten lässt sich anhand der Umsetzung in beiden Studien (vgl. Kapitel 5.4.1, 6.4.1) festhalten, dass sich die Auswertung auf die Analyse der Einzelblickdauern und die Anzahl (Nummer) der Blicke beschränken kann. Die Betrachtung der Blicke über 1.5 s Dauer bei maximal drei Blicken insgesamt (Zwahlen, Adams & DeBald, 1988) ist eher im realen Straßenverkehr einsetzbar. Im Fahrsimulator lassen sich die Testpersonen generell mehr Zeit und überschreiten damit sehr schnell diese harte Grenze.

Generell zeigte sich, dass der erste Blick auf eine Systemzustandsanzeige entscheidend für die Bewertung des Modusbewusstseins ist. Dies betrifft jedoch ausschließlich die Aktivierungsphasen. Analog zu den Fahrverhaltensdaten finden sich hier entweder sehr lange Blickdauern vor der Systemeinschaltung oder ein ausbleibendes Suchverhalten nach Informationen. Erstere Verhaltensweise spiegelt erwartungsinkonforme oder intransparente Übergänge wider. Daher konnten gleichfalls positive Korrelationen zur Länge der Aktivierungsdauer sowie negative Zusammenhänge zur Nachvollziehbarkeit der Transition bestätigt werden (vgl. Kapitel 6.5.1). Im zweiten Fall zeigt die Reaktion eher die Auswirkungen mental abweichender Nutzermodelle

vom realen Systemverhalten. Hier hat die Analyse der Blicke auf die Systemzustandsanzeige kein weitergehendes Auflösungspotential und muss durch andere Kenngrößen (z.B. Fahrdaten) ergänzt werden.

In Übernahmesituationen ist die Auswertung der Blicke zudem nur eingeschränkt sinnvoll, da die Probanden ihre Aufmerksamkeit schnell auf den Straßenverkehr und nicht auf das HMI richten. Daher differenzierte der Parameter weniger gut zwischen den hier betrachteten Bedingungen. Er zeigte zudem nur Zusammenhänge zu subjektiven Kenngrößen (z.B. Nachvollziehbarkeit der Transition). Dabei ist zu beachten, dass in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Videoaufzeichnungen mit teilweise geringer Framerate zur Beurteilung verwendet wurden (vgl. Kapitel 5.4.1). Blickerfassungssysteme könnten über die Auswertung von Areas of Interests (AOI) oder Blickverläufen innerhalb des Zeitfensters der Transition (Landscapes) weiteren Aufschluss geben. Übergreifend stützten die Videodaten vor allem die Detailanalysen von denjenigen Probanden, bei welchen Automation Surprises dokumentiert wurden.

- Biophysiologicalische Daten: Die Aufzeichnung von biophysiologicalischen Daten führte ausschließlich in der Fahrsimulatorstudie zu validen Werten. In der Realfahrtuntersuchung wurden diese zwar gemessen, jedoch bedingte die Testdauer und die Unkontrollierbarkeit äußerer Einflussgrößen (z.B. Verkehr, Wetter) die Nicht-Verwendbarkeit der Daten. Hintergrund der Integration von Biosignalen in die vorliegende Arbeit war die Idee, dass Einbußen im Modusbewusstsein des Fahrers sowie intransparente Übergänge zu verstärkten, psychophysiologischen Beanspruchungszuständen führen (Boucsein, 2006). Jene sollten mit einer Begleitreaktion des vegetativen Nervensystems einhergehen und sich in spezifischen Mustern niederschlagen (Sokolov, 1960). Damit zusammenhängend wurden Kennzeichen einer Orientierungsreaktion postuliert (Boucsein & Bracks, 2000), die mit charakteristischen Verläufen elektrodermalen sowie kardiovaskulärer Kenngrößen verbunden sind (vgl. Kapitel 6.4.3). Auf Basis der Erkenntnisse der Fahrsimulatorstudie lässt sich allerdings festhalten, dass die Herzrate (bpm) und die Herzratenvariabilität (MQSD, 0,1 HZ Komponente) weniger gut geeignet sind, transitionsspezifische Unterschiede aufzulösen. Sie bilden eher allgemeine Beanspruchungszustände ab, welche primär durch die Versuchsfahrten an sich bedingt waren (vgl. Kapitel 6.5.1). Da zudem keine Systematik in der Veränderung der kardiovaskulären Größen vorlag, ist deren Eignung für die Analyse des Modusbewusstseins des Fahrers in Frage zu stellen. Anders verhielt es sich mit den elektrodermalen Größen. Hier konnte anhand der Hautleitfähigkeitsparameter „Amplitudengröße“ und „Erholungszeit“ ein Reaktionsmuster bestätigt werden, welches für eine veränderte Informationsverarbeitung mit

verstärkter Aktivität des Effort-Systems spricht (Boucsein, 1992). Dies betraf jedoch erneut nur die Aktivierungsphasen. Hohe Amplituden und lange Erholungszeiten korrelierten gleichfalls mit der Dauer der Aktivierung bzw. des ersten Blicks auf die Systemzustandsanzeige. Es zeigten sich zudem positive Zusammenhänge zur subjektiv wahrgenommenen Reaktionsschnelligkeit (vgl. Kapitel 6.5.1). In Übernahmephase ließ sich anhand dieser elektrodermalen Parameter nur ein erhöhtes Arousal-Niveau feststellen. Hintergrund dessen ist, dass Transitionen in Richtung Fahrer von den Probanden allgemein als sehr beanspruchend empfunden wurden. Zudem moduliert die Automatisiertheit der Übernahmereaktion den geringen Effektnachweis in der Hautleitfähigkeitsreaktion.

Unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses bei der Aufzeichnung und Analyse von biophysiologicalen Daten sollte daher deren Einsatz gut abgewogen werden. Grundsätzlich sind die gefundenen Verhaltensmuster zwar interessant, aber immer nur in Relation zu weiteren subjektiven und objektiven Leistungsmaßen auflösbar (psychophysisches Kovariationsproblem nach Fahrenberg, 1979). Darüber hinaus konnte analog zu den Blickdaten festgestellt werden, dass die Varianz der Reaktion über die Anzahl der erlebten Transitionen abnahm. Sie ist demgemäß nur in frühen Phasen der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion zu erwarten. Offen bleibt, ob durch die Anpassung des betrachteten Zeitfensters (5 s vor und 12 s nach dem Übergang) sowie der Verwendung anderer Korrekturverfahren (hier: Lykken et al., 1966; Ribback, 2003) abweichende Erkenntnisse erzielt werden können.

- Fragebogendaten: Bezüglich der Fragebogendaten zeigte sich, dass Einschätzungen zur Befindlichkeit vor und nach dem Versuch (Eilers, Nachreiner & Hänecke, 1986) grundsätzlich den Trend aufweisen, dass die Probanden müder und beanspruchter sind. Dieses Maß scheint daher nicht ausreichend zwischen einzelnen Bedingungen zu differenzieren. Es bildet versuchsdauerabhängige Effekte ab.

Mit Bezug auf die Fragen zu den erlebten Transitionssituationen (vgl. Kapitel 5.4.3 und Kapitel 6.4.4) eignen sich vor allem die subjektiv wahrgenommene Verständlichkeit des Systemvorschlags und die Nachvollziehbarkeit der Transition zur Beurteilung des Modusbewusstseins. Sie korrelierten zudem negativ mit der Aktivierungs- bzw. Blickdauer und zeigen logische Zusammenhänge innerhalb der subjektiven Daten. Die eingeschätzte Reaktionsschnelligkeit verhält sich hingegen teils asynchron zur objektiven Aktivierungsdauer. Den Testpersonen fällt es demnach schwer, dieses Item realistisch zu bewerten. Die Beurteilung der wahrgenommenen Desorientierung ist wiederum gut möglich und zeigt Zusammenhänge zum Blickverhalten (vgl. Kapitel 6.5.2). Interessant ist, dass die Fragebogendaten sowohl in Aktivierungs- als

auch in Übernahmeszenarien Aussagen zum Modusbewusstsein erlaubten. Gerade in letzteren Situationen erleichtern sie die Interpretation des Fahrerhaltens. Hilfreich waren hier ebenso die Versuchsleiterprotokolle, die durch die Dokumentation von Mode Confusion auf Basis des Verhaltens der Probanden eine einzelfall-spezifische Betrachtung der Daten ermöglichte.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass in beiden Untersuchungen eine Vielzahl an Items beantwortet wurde, die teilweise nicht zielführend zur Analyse der Fragestellungen waren. Aufgrund des explorativen Charakters der Arbeit konnte daher erst im Nachhinein die Identifizierung bzw. Selektion relevanter Items erfolgen.

Bevor der Vergleich der Erkenntnisse aus dem Fahrkontext zur Luftfahrt erfolgt und das zusammenfassende Fazit gezogen wird, ist es weiterhin nötig, die **methodischen Einschränkungen beider Studien** zu nennen. So ist zunächst das Versuchsdesign näher zu diskutieren. Demgemäß verzichtete die Realfahrtstudie auf die vollständige Variation der dort untersuchten Transitionsmerkmale sowie Automatisierungsgrade (vgl. Kapitel 5.3.5). Zudem wurde der Versuchsplan aus praktischen Gründen in einen Testablauf eingebettet (vgl. Kapitel 5.3.6), der für die Auswertung eine Umstrukturierung der Daten bedingte. Damit verbunden können systematische Verzerrungen in den Werten aufgetreten sein, die trotz der randomisierten Zuordnung der Probanden die Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränken. Darüber hinaus sind Effekte der Versuchsreihenfolge nicht ausschließbar sowie statistisch analysierbar. In der Fahrstudie ist gleichfalls anzumerken, dass mit der Übertragung des Versuchsplans (vgl. Kapitel 6.3.5) auf einen geeigneten Testablauf (vgl. Kapitel 6.3.6) die Analyse der Zwischen- und Innersubjektfaktoren in Abhängigkeit des betrachteten Transitionsmerkmals eine andere Wertezusammenstellung bedingte. So fand die Auswertung sowohl innerhalb als auch über die Modusgruppen hinweg statt (vgl. Kapitel 6.3.6) und setzte eine Selektion vergleichbarer Daten voraus. Damit verbunden sind Effekte auf die Inferenzstatistik anzunehmen, welche einerseits über die Varianz und Unabhängigkeit der Werte die Teststärke beeinflussten. Andererseits verursachte dies teils komplexe Wechselwirkungen, welche die tatsächliche Ausprägung der abhängigen Variablen vom jeweiligen Start- und Endmodus des Übergangs untrennbar machte.

Des Weiteren ist die wiederholte Darbietung der Transitionsergebnisse zu diskutieren. Obwohl der Ort nicht vorhersehbar war, muss davon ausgegangen werden, dass die hier beobachteten Verhaltensweisen nicht für einen gänzlich unvorbereiteten Fahrer stehen. Teilweise stützen dies die Ergebnisse, welche auffällige Werte in den erhobenen Daten in den ersten Phasen der Fahrer-Automation-Interaktion belegen (Positionseffekt). Die Fahrer lernten mit den Transitionen zwischen den Systemmodi umzugehen. Um jene Auswirkungen zu vermeiden, bieten sich Ansätze an, die die Effekte eines einmaligen Ereignisses nach



längerer Fahrt ohne vorausgehende Situationen untersuchen. Dies ist vor allem bei der Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion in zeitkritischen, sehr selten auftretenden Szenarien notwendig. Obwohl sich in der Simulatorstudie unter der gegebenen Nutzungsdauer keine Auffälligkeiten abbilden ließen, die für ein Übermaß an Systemvertrauen oder für Überbeanspruchung infolge der automationsbedingten Vigilanzminderung sprechen, sollte die isolierte Prüfung kurzfristiger Eingriffssituationen nicht alleinige Basis für die Abschätzung der Auswirkung von Übergängen aus höher automatisierten Fahrfunktionen sein. Zudem ist für Transitionen in Richtung Automation auf Basis von Langzeituntersuchungen zu erwarten, dass Nutzungshäufigkeiten und Gewöhnungseffekte andere Bedürfnisse der Fahrer für die Gestaltung der Übergabesituationen hervorrufen. In dem Zusammenhang ist die Einbindung von Assistenzsystemen zur (De-)Aktivierung von automatisierten Funktionen denkbar. Die erhaltenen Erkenntnisse aus beiden Untersuchungen sind deshalb nur auf die Erstinteraktion des Fahrers mit den Systemen des vierstufigen Automationsansatzes übertragbar.

Dabei ist ferner zu berücksichtigen, dass gerade im Fahrsimulator die kinästhetischen Rückmeldungen der Fahrfunktionen ausblieben. Den Probanden fehlte damit ein Zustandsfeedback, welches in beiden Studien einen hohen Stellenwert nach den Transitionen hatte sowie die Wahrnehmung der Diskrepanz zwischen dem gewünschten und dem aktuellen Systemverhalten erschwerte. Dies modulierte entscheidend die Zeitdauer für die Entdeckung der aufgetretenen Handlungsfehler (Sarter & Woods, 1995). Weiterhin differenzierte das HMI auf der Systemzustandsanzeige weniger gut zwischen dem Modus „Assistent“ und „Pilot“ (vgl. Kapitel 5.3.3, 6.3.3.) und wurde zudem in den Untersuchungen nicht gezielt variiert. Trotz der Zweitrangigkeit jener Displayinformationen, ergeben sich hier Verbesserungspotentiale für die Vermittlung der Funktionen in Folgeuntersuchungen.

Neben der Darstellung ist ebenso anzumerken, dass die abgeleiteten Systemmodi (vgl. Kapitel 4.2.2) nicht eindeutig gemäß der Definition der Automationsstufen umgesetzt wurden (vgl. Kapitel 2.1.3). So konnten die Testpersonen bei der Funktion „Assistent“ zwar weitestgehend die Querführung abgeben, mussten jedoch immer noch an den Fahrbahnrändern eingreifen. Beim Modus „Pilot“ banden die Versuche zudem keine Durchführung von Nebentätigkeiten ein, die zusätzlich Einfluss auf die Wahrnehmung und den Umgang mit dem hochautomatisierten System gehabt hätten (z.B. Damböck et al., 2013; Petermann et al., 2013; Radlmayr et al., 2014). Eventuell modulierte ebenso die Namensgebung die Erwartung der Probanden an die Interaktion mit den Funktionen innerhalb des Automationsansatzes. Darüber hinaus haben Fahrzeugführer gemäß SAE (2014) bei der Nutzung eines hochautomatisierten Systems mindestens zehn Sekunden für die vollständige Über-

nahme der Fahrzeugführungskontrolle Zeit und sollten demnach nicht mit unvorhersehbaren bzw. zeitkritischen Transitionen in Richtung Fahrer konfrontiert werden.

Weiterhin könnte die etwas höhere Technik- und Automobilaaffinität der vorliegenden Stichproben (vgl. Kapitel 5.3.7, 6.3.7) eine Rolle gespielt haben. Dabei ist insbesondere die Vorerfahrung der Testpersonen aus der Realfahrtuntersuchung zu nennen, welche durch den vorausgehenden Versuchsabschnitt (vgl. Kapitel 5.3.4) Wissen zu automatisierten Systemen aufgebaut hatten und jenes womöglich auf die nachfolgend erlebten Funktionen übertrugen. Darüber hinaus ging mit der Rekrutierung über die betriebsinterne Probandendatenbank ein gewisser Grad an Selbstselektion und Sponsorship-Effekt einher. Zusätzlich konnte keine Gleichverteilung der Geschlechter erreicht werden. Neben der Unterrepräsentanz von Frauen in der ersten Untersuchung (vgl. Kapitel 5.3.7), schloss die Fahrstudie nur Männer in die Analysen ein (vgl. Kapitel 6.3.7). Auch wenn theoretisch kein Unterschied in der Beurteilung erwartet wurde, ist in Folgebetrachtungen eine Gleichverteilung anzustreben. Zur Minimierung weiterer Einflussgrößen auf die Varianz der Werte ist ferner eine a priori Bestimmung der optimalen Stichprobengröße empfehlenswert. So kann davon ausgegangen werden, dass die relativ kleine Anzahl an Probanden in der Realfahrtuntersuchung mit der daraus resultierenden, geringen Teststärke bedeutsame Effekte minimierte (Bortz, 2005). Zusätzlich bedingte die Streuung innerhalb der betrachteten abhängigen Variablen, dass das reale Fahrscenario nicht in allen Fällen zu vergleichbar signifikanten Ergebnissen wie die künstliche Laborsituation führte.

In dem Zusammenhang kann gleichfalls der Übertrag der betrachteten Transitionsmerkmale (vgl. Kapitel 4.2.4) kritisiert werden, der zum einen in Abhängigkeit des Versuchssettings mit Unterschieden in den eingebetteten Anwendungsfällen einherging (vgl. Kapitel 5.3.2, 6.3.2 und 6.3.4). Zum anderen bewirkte der Transfer derjenigen Kriterien mit höherer Wahrscheinlichkeit für „Automation Surprises“ eine relativ starke Anpassung für den Fahrkontext. So wurden Veränderungen innerhalb des Systemmodus gar nicht berücksichtigt, da diese aus haftungsrechtlichen Gründen entweder nicht zulässig sind oder in der Systementwicklung bereits Voraussetzungen für deren Vermeidung geschaffen werden. Mit Rückblick auf die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit scheint jedoch gerade die Adäquatheit des Feedbacks über den aktuellen Systemzustand ein Faktor für die Ausprägung des Modusbewusstseins des Fahrers zu sein (Norman, 1990). Dies ist voraussichtlich bei vernetzten und komplexen Modi mit Subzuständen noch stärker gegeben (Sellen, Kurtenbacher & Buxton, 1992; Anthony & Degani, 1997). Demgemäß könnte bei der zukünftigen Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen hin zur Automation eine Funktionsvielfalt im Fahrzeug vorhanden sein, die über die hier betrachteten Modi hinausgeht. Der Grad bzw. die Weite der Kontroll-

verschiebung nimmt damit exponentiell zu und hat direkten Einfluss auf die Anzahl sowie Komplexität denkbarer Transitionen. Dabei ist für die vorliegende Arbeit einschränkend anzumerken, dass mit dem „Grad der Kontrollverschiebung“ stets ein Übergang aus bzw. in „Fahrer selbst“ verbunden war. Dies resultierte einerseits daraus, dass das Merkmal „Indirekte Transition“ bereits den Übergang in bzw. auf die Zwischenstufe „ACC“ einschloss. Andererseits hing die Definition mit dem Automationsansatz zusammen, der nur vier Stufen umfasste. Beides führte jedoch dazu, dass keine uneindeutige Trennung der zwei Kriterien gegeben war und Abhängigkeiten geschaffen wurden, die sich teilweise in den Ergebnissen wiederfinden. Der Übertrag des Merkmals „Indirekte Transition“ passt zudem nur partiell zu der in der Luftfahrt identifizierten Rahmenbedingung. So wird hier gleichfalls von impliziten Übergängen gesprochen (Leveson & Palmer, 1997), die ohne expliziten Input vom Operator stattfinden. Für den Fahrkontext sind diesbezüglich Situationen denkbar, in denen die Automation eigenständig den Systemzustand verändert oder ihn nach kurzzeitiger Fahrerüberstimmung wieder herstellt (Reaktivierung). Insbesondere der zuletzt genannte Fall ist in der Literatur mit dem Auftreten von Mode Errors dokumentiert (Anthony & Degani, 1997).

Abschließend sei anzumerken, dass eine größere Automationsbandbreite mit mehr Systemmodi komplexere Vergleiche ermöglichen würde, die nicht nur Unterschiede in Referenz zum „Grad der Kontrollverschiebung“ beinhalten. Zudem wäre auf diese Weise die Integration von anderen, einander ähnlichen Funktionen sowie Teilstufen der Automation denkbar. Auf jener Basis könnte man weiterhin validere Aussagen zur maximalen Anzahl an gleichzeitig verfügbaren Systemen im Fahrzeug und deren Art der Zusammensetzung treffen. Unter Bezugnahme der vorliegenden Ergebnisse scheint die Menge an Systemen, die der Fahrer in einem mehrstufigen Automationsansatz differenzieren kann, von der Funktion abhängig zu sein, die als maximale Endausprägung im Fahrzeug verfügbar ist. So geht mit zunehmender Entbindung des Fahrers aus dem Kontrollloop eine „Entweder-oder-Verknüpfung“ der Funktionen einher. Jene erhöht die Transparenz und Nachvollziehbarkeit seitens des Nutzers. Ist der Fahrer hingegen noch anteilig an der Fahraufgabe beteiligt, sind technische Zwischenstufen denkbar. Hierbei ist aber zu beachten, dass diese für den Nutzer eindeutig voneinander abgrenzbare Modi darstellen sollten. Sobald die Grenzen ineinander übergehen, ist von einer höheren Wahrscheinlichkeit für Mode Confusion auszugehen (Sarter, Woods & Billings, 1997). Folglich kann der Fahrer die Hinzunahme einer querführenden Assistenz zu einem bereits in Längsrichtung regelnden System sehr gut differenzieren. Unterscheiden sich die Funktionen zusätzlich in ihrer Stärke oder Art der Unterstützung, entstehen Schwierigkeiten im Systemverständnis. Berücksichtigt man die daraus resultierende Anzahl an Fahrfunktionen, welche für den Fahrer die

Voraussetzung der Trennbarkeit erfüllen, lässt sich annehmen, dass nicht mehr als drei Modi differenzierbar sind.

Unter Einbezug der zuletzt analysierten Diskussionspunkte kann auf die Frage, welche **Unterschiede und Gemeinsamkeiten** für Übergabe- bzw. Übernahme-situationen **im Fahrzeug im Vergleich zur Luftfahrt** bestehen, geantwortet werden, dass auch hier Automation Surprises auftreten. Die wichtigste Stellgröße ist dabei die gleichzeitige Verfügbarkeit von einander ähnlichen Funktionen. Modusverwechslungen mit einhergehenden Handlungsfehlern finden sich insbesondere in Aktivierungssituationen und lassen sich nicht durch eine optimierte Gestaltung des Übergangs verhindern. In zeitkritischen Übernahmeszenarien konnten im Unterschied zur Luftfahrt keine derartigen Einbußen festgestellt werden, obwohl sich ebenso eine Vergrößerung des Zeitfensters für die Reaktion ergab (Endsley, 1996). Es zeigte sich außerdem, dass eine Transition nicht die notwendige Bedingung für Mode Confusion ist. So ging mit dem Merkmal „Ähnlichkeit von Systemmodi“ im Automationsansatz generell eine höhere Auftretenswahrscheinlichkeit einher.

Vergleichbar mit den Erkenntnissen der Luftfahrt ist, dass mit zunehmender Automation der Wunsch der Nutzer besteht, direktere Verknüpfungen im Gesamtsystem zu schaffen. Das Ausmaß der Entbindung des Fahrers aus der Fahraufgabe (Merkmal: „Grad der Kontrollverschiebung“) interagierte dabei mit der Möglichkeit der Nutzung von Zwischenstufen der Automation (Merkmal: „Indirekte Transition“). Beide Kriterien konnten im Fahrkontext jedoch in keinen Bezug zu Automation Surprises gesetzt werden. Sie modulieren eher durch ihre Gestaltung die Qualität des aufgebauten Systembilds (Norman, 1983b), determinieren Reaktionshemmnisse des Nutzers bei fehlender Passung der Mensch-Automatisierungs-Kompatibilität (Flemisch et al., 2009) und können bei Verletzung der Nutzerannahmen zu Fehlbedienungen sowie Einbußen im aktiven Nachvollziehen der Systemzustände führen (Sarter & Woods, 1994). Sie sind daher stark durch top-down Prozesse der Informationsverarbeitung überlagert, welche auf generischen Wissensstrukturen basieren und die Effizienz der Entscheidungen sowie Handlungen bestimmen (Kluwe & Haider, 1990). Analog zur Luftfahrt ließ sich demgemäß in der vorliegenden Arbeit nachweisen, dass die Erwartung an ein System und dessen Verknüpfung innerhalb der verfügbaren Funktionsbandbreite ein zunächst änderungsresistentes Verhalten bewirkte (Dutke, 1994). Dies kann sich allerdings im Verlauf der Interaktion durch Erfahrungsaufbau verändern und spiegelt dann Unterschiede in kognitiven Strukturen von Experten sowie Novizen wider (Doane, Pellegrino & Klatzky, 1990). Der Rückgriff auf Vorwissen prägte damit ebenfalls den Lernverlauf von Fahrzeugführern (Simon, 2005) und ist bei der Gestaltung von Zustandsveränderungen im Gesamtsystem zu berücksichtigen.

Im Gegensatz zum Flugwesen bestätigte sich, dass Fahrer nach einer Transition weniger die visuellen Anzeigen beachten, sondern die Aufmerksamkeit auf die viel dynamischere Fahrsituation legen (Flemisch, Vollrath & Rataj, 2007) und sich zusätzlich an anderen Rückmeldekanälen orientieren. Besondere Bedeutung hat hier das kinästhetische Feedback erhalten, welches durch eine saliente Darstellung von relevanten Informationen im Blickfeld des Fahrers anzureichern ist (Palmer, 1995). Dies ist vor allem deshalb wichtig, weil der Fahrer zumeist kein Experte ist, der kontinuierlich an den jeweiligen Systemen trainiert und ausgebildet wird. Die Vergleichbarkeit des Arbeitsplatzes des Piloten und des Fahrers ist damit nur eingeschränkt möglich (Vollrath & Flemisch, 2006). Dies zeigt sich gleichfalls in dem Versuch, Rahmenbedingungen für Automation Surprises auf den Fahrkontext zu übertragen und zu prüfen (vgl. Kapitel 4.2.4). Auch wenn jener Transfer nicht in allen Fällen exakt funktionierte, so ließen sich zumindest Gestaltungsempfehlungen für Übergabe- und Übernahmesituationen innerhalb des definierten Automationsansatzes anhand der betrachteten Kenngrößen ableiten.

Demgemäß kann mit Hilfe von Zustandsdiagrammen (Burmester, Hellbrück & Meroth, 2008) ein **abschließendes Fazit** zum Schwerpunkt dieser Arbeit gezogen werden. Jenes ist in der Abbildung 103 in Form derjenigen Transitionen in Richtung Fahrer bzw. Automation dargestellt, die für die betrachteten Automationsstufen mit vier zugehörigen Systemmodi als geeignet angesehen werden.

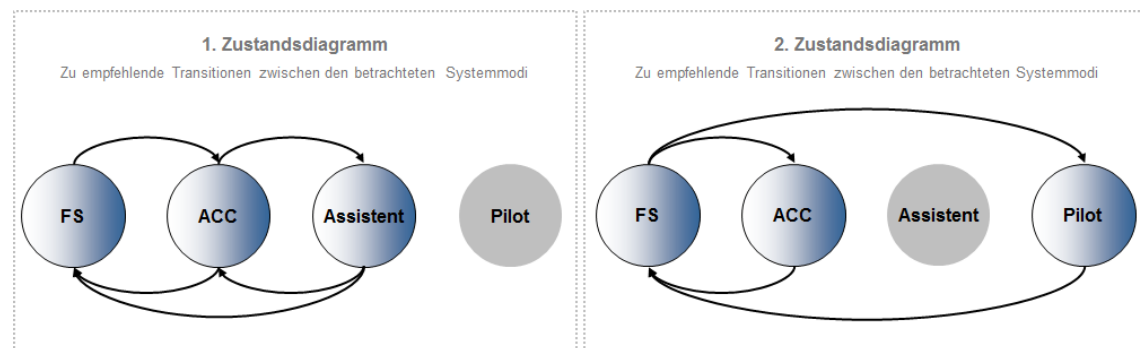


Abbildung 103: Zustandsdiagramme mit Empfehlungen für die Gestaltung der Übergabe- und Übernahmesituationen innerhalb des betrachteten, vierstufigen Automationsansatzes

Gemäß Abbildung 103 lassen sich einerseits Übergänge über Zwischenstufen der Automation empfehlen, wenn der Fahrer noch in den Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Straße eingebunden ist (vgl. Abbildung 103, links). Liegen höher automatisierte Systeme vor, in denen sich der Fahrer für einen bestimmten Zeitraum aus der Fahraufgabe zurückziehen kann, sind hingegen direkte Verknüpfungen im Sinne einer „Entweder-oder-Logik“ zu bevorzugen (vgl. Abbildung 103, rechts). Wesentlich ist dabei, dass dem Fahrer im Fahrzeug

klar voneinander abgrenzbare Fahrfunktionen zur Verfügung stehen, die er in Transitions-situationen zu jederzeit kognitiv voneinander unterscheiden kann. Aus diesen Gründen wird gemäß Abbildung 103 für den vorliegende Automationsansatz empfohlen, die einander funktional ähnlichen Systemmodi „Assistent“ und „Pilot“ nicht gleichzeitig im Fahrzeug anzubieten. Insbesondere in den für „Automation Surprises“ sensitiven Aktivierungsphasen können auf jene Weise Modusverwechslungen verhindert werden.

Mit Bezug zur Abbildung 103 ist allerdings zu beachten, dass die Ableitungen nur für frühe Phasen der Systeminteraktion gelten und damit keine Lerneffekte einschließen. Weiterhin beruhen sie auf der Einhaltung der Kompatibilität der Nutzererwartungen zum Systemverhalten, die aus der Analyse der erfassten Verhaltens- sowie Bewertungsdaten resultiert. Ferner gilt, dass ein Vergleich der Ergebnisse zu anderen Untersuchungen nur unter Einbezug der diskutierten Einschränkungen der Arbeit erfolgen darf.

## **8      Ausblick**

Die vorliegende Arbeit zeigt, wie wichtig es ist, die Erwartungen und mentalen Repräsentation des Nutzers bei der Interaktion mit automatisierten Systemen in deren Entwicklung einfließen zu lassen. Dies gewährleistet die Vermeidung von akzeptanz- bzw. vertrauensmindernden Inkonsistenzen, verringert Einbußen im Aufbau des Wissensmodells und verhindert handlungsrelevante Phänomene wie Mode Confusion. Die Arbeit verdeutlicht jedoch auch, wo weiterer Untersuchungsbedarf besteht. Jener betrifft einerseits die tiefergehende Analyse von HMI Konzepten, die über die Qualität und Positionierung von Informationen einen Beitrag zur Erhöhung der Transparenz von Zustandsveränderungen leisten. Ziel zukünftiger Funktionsallokation im Fahrzeug sollte demnach sein, nicht die Verschiebung der Kompetenz, sondern die Transparenz dieser zu adressieren (Haller, 2001). Aktuelle Ansätze dafür finden sich in Studien zur Wirkung neuartiger Modalitäten oder Visualisierungen zur Fahrerunterstützung beim teil- bzw. hochautomatisierten Fahren (z.B. Beller, Heesen & Vollrath, 2013; Hackenberg et al., 2013; Wieland, 2013; Lorenz, Kerschbaum & Schumann, 2014; Petermann-Stock et al., 2015). Damit zusammenhängend sollte vor allem der Gebrauch non-visueller Kanäle wie die der Akustik und Haptik fokussiert werden, die zu proaktivem Handeln führen können (Monk, 1986; Sellen, Kurtenbach & Buxton, 1993). Andererseits ist es wichtig, den Umgang des Fahrers mit Übernahme- und Übergabeszenarien zwischen mehreren Automationsstufen einer Langzeitbetrachtung zu unterstellen. Die einhergehende Analyse von Lern- und Gewöhnungseffekten sollte weiterhin in realen Fahrsituationen stattfinden und schwerpunktmäßig die Auswirkungen der Nutzungshäufigkeit sowie der Vertrauenszunahme adressieren. Interessant ist dabei, welche Rolle Fertigkeitsverluste (Manzey, 2008) und Verhaltensanpassungen (Vrolix, 2006) spielen. Daran anschließend gilt es, den beanspruchungsmodulierenden Faktor der Daueraufmerksamkeit näher zu betrachten, der gerade bei teilautomatisierten Systemen Defizite im Modusbewusstsein bedingen kann (Buld, Tietze & Krüger, 2005; Othersen, Petermann-Stock & Vollrath, 2013). In Ergänzung dazu muss für hochautomatisierte Funktionen der Effekt von Nebentätigkeiten auf die Effizienz der Fahrerübernahme analysiert werden. So benötigt bereits der manuelle Fahrer je nach Situationskomplexität zwei bis drei Sekunden zur Vorwegnahme einer Situation (Braess & Donges, 2006). Findet zusätzlich eine Aufmerksamkeitsverschiebung hin zu einer Nebenaufgabe während der automatisierten Fahrt statt, verlängert sich das Zeitfenster für die Reaktion des Fahrers (vgl. Damböck et al., 2012; Merat et al., 2012; Gold et al., 2013; Petermann-Stock et al., 2013; Radlmayr et al., 2014). Damit müsste sich der Zeitpunkt der Auslösung der Transition dynamisch verlagern, um die Übernahmefähigkeit des Fahrers zu garantieren. Mit Bezug zu den offenen Studienfragen ist abschließend wichtig, dass auch Aktivierungsszenarien in die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion eingebunden werden. Sie sind sensitiv für Automation Surprises.

## 9 Literaturverzeichnis

- Abendroth, B., & Bruder, R. (2009). Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (S. 4-14). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Adams, M. J., Tenney, Y. J., & Pew, R. W. (1995). Situation awareness and the cognitive management of complex systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37 (1), 85-104.
- Åhsberg, E., & Gamberale, F. (1998) Perceived fatigue during physical work: An experimental evaluation of a fatigue inventory. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 21(2), 117-131.
- Åhsberg, E., Gamberale, F., & Kjellberg, A. (1997) Perceived quality of fatigue during different occupational tasks - Development of a questionnaire. *International Journal of Industrial Ergonomics* 20(2), 121-135.
- Albrecht, F. (2005): *Die rechtlichen Rahmenbedingungen bei der Implementierung von Fahrerassistenzsystemen zur Geschwindigkeitsbeeinflussung*. Deutsches Autorecht DAR (4), 186-198.
- Anderson, J. R. (1996). *Kognitive Psychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Anderson, D. I., Magill, R. A., & Sekiya, H. (2001). Motor learning as a function of KR schedule and characteristics of task-intrinsic feedback. *Journal of Motor Behaviour*, 33(1), 59-66.
- Anthony, A., & Degani, A. (1997). Do you know what mode you're in? An analysis of mode error in everyday things. In M. Mouloua & J. M. Koonce (Eds.), *Human-automation interaction: Research and practice* (pp. 19-28). Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum.
- Aschenbrenner, K. M., Biehl, B., & Wurm, G. W. (1992). Mehr Verkehrssicherheit durch bessere Technik? Felduntersuchung zur Risikokompensation am Beispiel des Antiblockiersystems. In Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), *Bericht zum Forschungsprojekt 8323*. Bergisch Gladbach.
- Ashby, W. R. (1956). *An introduction to cybernetics*. New York: John Wiley & Sons.
- Bahner, J. E., & Manzey, D. (2004). Complacency – Begriffsklärung, Stand der Forschung und Implikationen für die Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion. In M. Grandt (Hrsg.), *Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion*. (DGLR-Bericht 2004-03) (35-48). Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt.
- Bailey, R.W. (1989). *Human Performance Engineering: A guide for system designers* (2<sup>nd</sup> ed.). Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of Automation. *Automatica*, 19(6), 775-779.



- Bartels, A. (2008). Roadmap Automatisches Fahren. In GZVB (Hrsg.), AAET 2008 - *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel* (S.349-364). Braunschweig: GZVB.
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: A study in experimental and social psychology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bauer, E., Lotz, F., Pfromm, M., Schreier, M., Abendroth, B., Cieler, S., Eckert, A., Hohm, A., Lücke, S., Rieth, P., Willert, V., & Adamy, J. (2012). PRORETA 3: An Integrated Approach to Collision Avoidance and Vehicle Automation. *Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik*, 60(12), (S. 755–765). Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Baum, L. F. (1900). *The wonderful Wizard of Oz*. Chicago: G. M. Hill.
- Baumann, M., Petzoldt T., & Krems, J. (2006). Situation Awareness beim Autofahren als Verstehensprozess. *MMI-Interaktiv* (11), 43-57.
- Becker, S., Sonntag, J., & Krause, R. (1994). *Zur Auswirkung eines Intelligenzen Tempomaten auf die mentale Belastung eines Fahrers, seine Sicherheitsüberzeugungen und (kompensatorischen) Verhaltensweisen*. Prometheus CED 5, TÜV Rheinland. Köln.
- Behringer, R. (1997). Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufs durch Rechnersehen für ein autonomes Straßenfahrzeug. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik. VDI-Fortschrittberichte*, Reihe 12, 310. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Behringer, R., & Müller, N. (1998). Autonomous Road Vehicle Guidance from Autobahnen to narrow curves. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(5), 810-815.
- Beier, G. (2004). *Kontrollüberzeugungen im Umgang mit Technik. Ein Persönlichkeitsmerkmal mit Relevanz für die Gestaltung technischer Systeme*. Dissertation, Humboldt Universität Berlin.
- Beier, G., Boemak, N., & Renner, G. (2001). Sinn und Sinnlichkeit – psychologische Beiträge zur Fahrzeuggestaltung und -bewertung. In T. Jürgensohn & K.-P. Timpe (Hrsg.), *Kraftfahrzeugführung* (1. Auflage) (S. 263-284). Berlin: Springer-Verlag.
- Beier, G., Enigk, H., & Renner, G. (2002). Methoden zur Bestimmung präferierter Automatisierungsgrade bei Assistenzsystemen. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Useware: Mensch-Maschine-Kommunikation - Design. VDI-Berichte, 1678* (231-235). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Beller, J., Hessen, M., & Vollrath, M. (2013). Improving the driver-automation interaction: An approach using automation uncertainty. *Human Factors*, 55, 1130-141.

- Belz, J., Növer, N., Mühlenberg, M., Nitsche, B. & Seubert, T. (2004). Fahrerassistenz im Spannungsfeld zwischen Komfort- und Sicherheitsanforderungen. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*, VDI Berichte, 1864 (S. 441-468), Düsseldorf: VDI.
- Bender, E., & Landau, K. (2006). Fahrerverhalten bei automatischen Brems- und Lenkeingriffen eines Fahrerassistenzsystems zur Unfallvermeidung. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *VDI-Berichte, 1931*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Bengler, K. (1995). *Gestaltung und experimentelle Untersuchung unterschiedlicher Präsentationsformen von Wegleitungsinformation in Kraftfahrzeugen*. Dissertation, Universität Regensburg.
- Bernotat, R. (1970). Anthropotechnik in der Fahrzeugführung. *Ergonomics*, 13(3), 353-377.
- Bernsen, N. O., Dybkjaer, H., & Dybkjaer, L. (1994). Wizard of Oz Prototyping: When and how? CCI Working Papers. *Cognitive Science and HCI*, WPCS-94-1. Centre for Cognitive Science, Roskilde University.
- Beukel, A.P. van den, & Voort, M.C. van der (2014). Design considerations on user-interaction for semi-automated driving. In *35th FISITA 2014 world automotive congress*.
- Bewersdorf, C. (2005). *Zulassung und Haftung bei Fahrerassistenzsystemen im Straßenverkehr*. Berlin: Duncker & Humblot.
- Biester, L. (2004). Der Einsatz von Kooperation zwischen Mensch und Maschine im Kraftfahrzeug. Application of cooperation between human and machine in cars. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. VDI-Berichte, 1864 (263-278). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Biester, L. (2005). The Concept of Cooperative Automation in Cars: Results from the experiment "Overtaking on Highways". *Proceedings of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*.
- Billings, C. E. (1991). *Human-centered aircraft automation: A concept and guidelines*. NASA Technical Memorandum 103885. Moffet Field, CA: NASA Ames Research Center.
- Billings, C. E. (1997). *Aviation Automation - The Search for a Human Centered Approach*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bloomfield, J. R., Levitan, A. L., Grant, A. R., Brown, T. L., & Hankey, J. M. (1998). *Driving performance after an extended period of travel in an automated highway system* (No. FHWARD-98-051). Georgetown Pike: U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration.
- Bortz, J. (1999). *Statistik für Sozialwissenschaftler* (5. vollst. überarbeitete und aktualisierte Aufl.). Berlin: Springer.

- Bortz, J., & Döring, N. (1995). *Forschungsmethoden und Evaluation für Sozialwissenschaftler* (2. vollst. überarbeitete und aktualisierte Aufl.). Berlin: Springer.
- Boucsein, W. (1992). *Electrodermal activity*. New York: Plenum University Press.
- Boucsein, W. (2006). Psychophysiologische Methoden in der Ingenieurpsychologie. In B. Zimolong & U. Konradt (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie. Themenbereich D Praxisgebiete. Serie III Wirtschafts-, Organisations- und Arbeitspsychologie*. Band 2 Ingenieurpsychologie (S. 317-358). Göttingen: Hogrefe Verlag für Psychologie.
- Boucsein, W., & Backs, R. W. (2000). Engineering psychophysiology as a discipline: Historical and theoretical aspects. In R. W. Backs & W. Boucsein (Hrsg.), *Engineering Psychophysiology. Issues and Applications* (S. 3-30). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Boucsein, W., & Thum, M. (1996). Multivariate psychophysiological analysis of stress-strain processes under different break schedules during computer work. In J. Fahrenberg, & M. Myrtek (Eds.), *Ambulatory assessment* (pp. 305-313). Seattle: Hogrefe & Huber.
- Braess, H.-H. (2003). Das intelligente Auto auf der intelligenten Straße – Was hat PROMETHEUS gebracht? In M. Bargende & J. Wiedemann (Hrsg.), *Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren – Automotive and Engine Technology. 5. Stuttgarter Symposium* (S.608-627). expert-Verlag.
- Braess, H.-H., & Donges, E. (2006). Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen - "Konsumierbare" oder echte Verbesserungen?. *2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, Garching bei München.
- Braess, H.-H., & Reichart, G. (1995). Prometheus: Vision des 'intelligenten Automobils' auf 'intelligenter Straße'? Versuch einer kritischen Würdigung - Teil 1. *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, 97(4), 200-205.
- Bredereke, J., & Lankenau, A. (2002). A Rigorous View of Mode Confusion. In S. Anderson, S. Bologna & M. Felici (Eds.), *Computer Safety, Reliability and Security* (pp. 19-31). SAFECOMP, LNCS 2434. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Bredereke, J., & Lankenau, A. (2005). Safety-relevant mode confusions - modelling and reducing them. *Reliability Engineering & System Safety*, 88(3), 229–245.
- Briest, S., & Vollrath, M. (2006). In welchen Situationen machen Fahrer welche Fehler? Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme durch In-Depth-Unfallanalysen. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. VDI-Berichte, 1960* (446-463). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and Communication*. London: Pergamon Press.
- Brockmann, M., Becker, S., Husemann, T., Mertens, A., Niu, R., Sonntag, A., & Sonntag, J. (1995). *Integrierte Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Fahrzeugregelung. Arbeitspaket 4: AICC – Prototypenevaluation*. Köln: TÜV Rheinland.

- Broggi, A., Bertozzi, M., Fascioli, A., Guarino Lo Bianco, C., & Piazzini, A. (1999). The argo autonomous vehicle's vision and control system. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 3(4), 409-441.
- Bruckmayr, E., & Reker, K. (1994). Neue Informationstechniken im Kraftfahrzeug. Eine Quelle der Ablenkung und der informatorischen Überlastung? *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 40(1), 12-23.
- Brühning, E., & Seeck, A. (2006). Bewertungen – Der Sicherheitsgewinn bisher entwickelter Fahrerassistenzsysteme und ein Blick in die Zukunft. Schriftenreihe Verkehrssicherheit. *Fahrerassistenzsysteme – Innovationen im Dienste der Sicherheit* (13), S. 18-22.
- Bubb, H. (1977). Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 31(2), S. 103-111.
- Bubb, H. (1993a). Informationswandel durch das System. In H. Schmidtke (Hrsg.), *Ergonomie*, München: Carl Hanser Verlag.
- Bubb, H. (1993b). Systemergonomie. In H. Schmidtke (Hrsg.), *Ergonomie*. München: Carl Hanser Verlag.
- Bubb, H. (2003). Fahrerassistenz - primär ein Beitrag zu Komfort oder für die Sicherheit? In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert, VDI-Berichte, 1768* (257-268). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Buck, J. R., & Yenamendra, A. (1997). Ergonomic issues on entering the automated highway system. In Y. I. Noy (Ed.), *Ergonomics and Safety of Intelligent Driver Interfaces* (pp. 309-328). Mahwah NJ: L. Erlbaum Associates Inc.
- Bühl, A., & Zöfel, P. (2005). *SPSS 12*. München: Pearson Studium.
- Buld, S., Hoffmann, S., & Krüger, H.-P. (2002). *EMPHASIS: Situationsbewusstsein und Performance - Handling in sicherheitsrelevanten Situationen*. Meilensteinbericht. Würzburg: IZVW.
- Buld, S., & Krüger, H.-P. (2003). Die Auswirkung von Teilautomation auf das Fahrverhalten. In M. Grandt (Hrsg.), *Entscheidungsunterstützung für die Fahrzeug- und Prozessführung* (S-241-253). Bonn: DLGR.
- Buld, S., Krüger, H.-P., Hoffmann, S., Kaussner, A., Tietze, H., & Totzke, I. (2002). Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit. *Veröffentlichter Abschlussbericht Projekt EMPHASIS: Effort-Management und Performance-Handling in sicherheitsrelevanten Situationen (Förderkennzeichen: 19 S 9812 7)*. Würzburg: Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg (IZVW)
- Buld, S., Tietze, S., & Krüger, H.-P. (2005). Auswirkungen von Teilautomation auf das Fahren. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (S. 161- 187) Berlin: Springer.

- Burmester, M., Graf, R., Hellbrück, J., & Meroth, A. (2008). Usability - Der Mensch im Fahrzeug. In A. Meroth & B. Tolg (Hrsg.), *Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen* (321-355). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Buschardt, B. (2003). Synthetische Lenkmomente. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Mensch-Maschine-Systeme. VDI-Fortschrittberichte*, Reihe 12, Band 16. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Bye, A., Hollnagel, E., & Steinar Brendeford, T. (1999). Human-machine function allocation: a functional modelling approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 64(2), 291-300.
- Card, S. K., Moran, T. P., & Newell, A. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Carroll, J. M., & Olson, J. R. (1988). Mental Models in Human-Computer Interaction: Research Issues about What the User of Software Knows. In M. Helander (Ed.), *Handbook of Human-Computer Interaction* (pp. 45-65). North Holland Press.
- Cavallo, V., & Cohen, A. S. (2001). Perception. In P. E. Barjonet (Ed.), *Traffic psychology today* (pp. 63-89). Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publisher.
- Chaloupka, C., Risser, R., Antoniadou, A., Lehner, U., & Praschl, M. (1998). *Auswirkungen neuer Technologien im Fahrzeug auf das Fahrverhalten*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M 84. Bergisch Gladbach: Wirtschaftsverband NW.
- Christoffersen, K., & Woods, D. D. (2002). How to make automated systems team players. In E. Salas (Ed.), *Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research* (Vol. 2) (pp. 1-12). Amsterdam: Elsevier Science.
- Clamann, M. P., Wright, M. C., & Kaber, D. B. (2002). Comparison of performance effects of adaptive automation applied to various stages of human-machine system information processing. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 342-346, Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Clarke, D. D., Ward, P., Bartle, C., & Truman, W. (2006). Young driver accidents in the UK: the influence of age, experience, and time of day. *Accident Analysis and Prevention* 38(5), 871-878.
- Cohen, A. S. (1994). Gefährdung des Fahranfängers sowie das Erlernen verkehrsgerechter Orientierung und deren Defizite in der Nacht. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 40(4), 156-160.
- Cohen, A. S. (1998). *Visuelle Orientierung im Straßenverkehr. Eine empirische Untersuchung zur Theorie des visuellen Abtastens*. BfU-Report 34.
- Cohen J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

- Coll, R. & Coll, J. H. (1989). Cognitive match interface design, a base concept for guiding the development of user friendly computer application packages. *Journal of Medical Systems*, 13(4), 227–235.
- Cook, R. I., Potter, S. S., Woods, D. D., & McDonald, J. S. (1991). Evaluating the human engineering of microprocessor-controlled operating room devices. *Journal of Clinical Monitoring*, 7(3), 217-226.
- Croft, L. B., Donnino, R., Shapiro, R., Indes, J., Fayngersh, A., Squire, A., Goldman, M. E. (2004). Age-related prevalence of cardiac valvular abnormalities warranting infectious endocarditis prophylaxis. *American Journal of Cardiology*, 94(3), 386-389.
- Crundall, D. E., & Underwood, G. (1998). Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*, 41(4), 448-458.
- Dahlbäck, N., & Jönsson, A. (1994). Empirical studies of discourse representations for natural language interfaces. *Proceedings of 4th Conference of the European Chapter of the Association For Computational Linguistics*, 291-298.
- Damböck, D., Farid, M., Tönert, L., & Bengler, K. (2012). *Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren*. 5. Tagung Fahrerassistenz.
- Damböck, D., Farid, M., Tönert, L. & Bengler, K. (2012). *Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren*. In 5. Tagung Fahrerassistenz, 2012. Quelle im Internet: URL: [http://www.ftm.mw.tum.de/uploads/media/24\\_Damboeck.pdf](http://www.ftm.mw.tum.de/uploads/media/24_Damboeck.pdf) (Stand: 21.07.2014).
- Darms, M. (2009). Fusion umfelderfassender Sensoren. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 237-248). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Degani, A., & Heymann, M. (2000). *Pilot-Autopilot Interaction: A Formale Perspektive*. Eighth International Conference on Human-Computer-Interaction in Aeronautics. Toulouse, France.
- Degani, A., & Kirlik, A. (1995). Modes in human-automation interaction: Initial observations about a modeling approach. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (pp. 3443-3450). Vancouver, Canada: IEEE.
- Degani, A., Mitchell, C. M., & Chappell, A. R. (1995). Task models to guide analysis: Use of the operator function model to represent mode transitions. In R. S. Jensen (Ed.), *Proceedings of the Eighth International Aviation Psychology Symposium* (pp. 210-215). Columbus, OH: The Ohio State University.
- Degani, A., Shafto, M., & Kirlik, A. (1995). Mode usage in automated cockpits: Some initial observations. In T. B. Sheridan (Ed.), *Proceedings of the International Federation of Automatic Control: Man-Machine Systems (IFAC-MMS) Conference*. Boston, MA: IFAC.

- Degani, A., Shafto, G., & Kirlik, A. (1996). Modes in automated cockpits: Problems, data analysis, and a modeling framework. *Proceedings of the 36th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences*. Haifa, Israel: Technion-IIT.
- Dekker, S. (2006). *The field guide to understanding human error*. Aldershot: Ashgate.
- Detemple, P. (2000). *Natürlich sprachliche Bedienung im Kraftfahrzeug - Erweiterung des Dialogkonzeptes um eine Komponente zur Steuerung von Mensch-Maschine-Dialogen*. Diplomarbeit. Technische Universität München.
- Deutschle, S. (2006). *Das KONVOI-Projekt – Entwicklung und Untersuchung des Einsatzes von elektronisch gekoppelten Lkw-Konvois auf Autobahnen*. 15. Aachener Fahrzeug- und Motorenkolloquium.
- De Vos, A. P., & Hoekstra, W. (1997). *Behavioural aspects of automatic vehicle guidance (AVG): Leaving the automated lane*. Report TM-97-C010. Soesterberg, The Netherlands: TNO Human Factors Research Institute.
- De Waard, D. (1996). *The measurement of driver's mental workload*. Groningen: Traffic Research Centre VSC.
- Dickmanns, E. D., Behringer, R., Dickmanns, D., Hildebrandt, T., Maurer, M., Thomanek, F., & Schiehlen, J. (1994). The seeing passenger car 'VaMoRs-P'. *Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium* (pp. 68–73). IEEE.
- DIN EN 292-1, (1991). *Sicherheit von Maschinen; Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsgrundsätze; Teil 1: Grundsätzliche Terminologie, Methodik*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 15005 (2002). *Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und -assistenzsystemen - Grundsätze und Prüfverfahren des Dialogmanagements*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 15622 (2002) *Transport information and control systems – Adaptive Cruise Control systems – Performance requirements and test procedures*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 17361 (2007). *Intelligent transportation systems - Lane departure warning systems - Performance requirements and test procedures*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 22179 (2008) *Intelligent transport systems – Full speed range adaptive cruise control (FSRA) systems – Performance requirements and test procedures*. Berlin: Beuth.
- Dingus, T. A., McGehee, D. V., Manakkal, N., Jahns, S. K., Carney, C., & Hankey, J. M. (1997). Human Factors Field Evaluation of Automotive Headway Maintenance/Collision Warning Devices. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39(2), 216-229.

- Di Nocera, F., Lorenz, B., & Parasuraman, R. (2005). Consequences of shifting from one level of automation to another: main effects and their stability. In D. de Waard, K. A. Brookhuis, R. van Egmond & T. Boersema (Eds.), *Human Factors in Design, Safety, and Management* (pp. 363 – 376), Maastricht, the Netherlands: Shaker Publishing.
- Doane, S. M., Pellegrino, J. W., & Klatzky, R. L. (1990). Expertise in a Computer Operating System: Conceptualization and Performance. *Journal Human-Computer Interaction*, 5(2), 267-304.
- Dominguez, C. (1994). Can SA be defined? In M. Vidulich, C. Dominguez, E. Vogel, & G. McMillan (Eds.), *Situation Awareness: Papers and Annotated Biography* (pp. 5-15). Wright-Patterson AFB, OH: Armstrong Laboratory.
- Donges, E. (1982). Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 27(2), 183-190.
- Donges, E. (2009). Fahrerverhaltensmodelle. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 15-23). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Dorißen, H. T., & Höver, N. (1996) Autonome Intelligente Geschwindigkeitsregelung (AICC) - Ein Beitrag zur Steigerung des Komforts und der aktiven Fahrsicherheit. *Automobil-technische Zeitschrift* 98 (7/8), 396-405.
- Dow, S., MacIntyre, B., Lee, J., Oezbek, C., Bolter, J. D., & Gandy, M. (2005). Wizard of Oz Support throughout an Iterative Design Process. *IEEE Pervasive Computing*, 4(4), 18-26.
- Dragutinovic, N., Brookhuis, K. A., Hagenzieker, M. P., & Marchau, V. A. W. J. (2005). Behavioural effects of Advanced Cruise Control Use – a meta-analytic approach. *European Journal for Transport and Infrastructure Research*, 5(4), 267-280.
- Draper, J. V. (1995). Teleoperators for advanced manufacturing: Applications and human factors challenges. *The International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 5(1), 53-85.
- Durso, F. T., & Gronlund, P. (1999). Situation Awareness. In F. T. Durso, R. Nickerson, R. Schvanefeldt, S. Dumais, S. Lindsay & M. Chi (Eds.), *Handbook of Applied Cognition* (pp. 283-314). New York: John Wiley & Sons.
- Dutke, S. (1994). *Mentale Modelle: Konstrukte des Wissens und Verstehens. Kognitionspsychologische Grundlagen für die Software-Ergonomie*. Göttingen: Verlag für angewandte Psychologie.
- Ebner, H.-T. (2013). *Motivation und Handlungsbedarf für Automatisiertes Fahren*. DVR-Kolloquium Automatisiertes Fahren, Bonn, 11.12.2013. Quelle im Internet: URL: [http://www.dvr.de/download2/p3745/3745\\_0.pdf](http://www.dvr.de/download2/p3745/3745_0.pdf) (Stand: 13.02.1015).



- Ehmanns, D. & Spannheimer, H. (2004). *Deliverable D2D Roadmap Development – Roadmap: ADASE Advanced Driver Assistance Systems in Europe*. ADASE 2 Consortium. Quelle im Internet: URL: <http://www.itsforum.gr.jp/Public/E4Meetings/P01/fremont0903.pdf> (Stand: 14.11.2014).
- Eickmeyer-Hehn, A. (2013). Bekanntmachung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von Richtlinien zur Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet „Adaptive, lernende Systeme – Für eine verständliche Interaktion zwischen Mensch und komplexer Technik“. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), *Ausschreibungen und Beschaffungen*. Quelle im Internet: URL: <http://www.bmbf.de/foerderungen/22836.php> (Stand: 02.11.2014).
- Eilers, K., Nachreiner, F., & Hänecke, K. (1986). Entwicklung und Überprüfung einer Skala zur Erfassung subjektiv erlebter Anstrengung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 40, 215-224.
- Eldredge, D., Dodd, R. D., & Mangold, S. J. (1991). *A review and discussion of flight management system incidents reported to the aviation safety reporting system*. Cambridge, MA: Volpe National Transportation Systems Center.
- Elvik, R., & Vaa, T. (2004). *The handbook of road safety measures*. Amsterdam, Elsevier.
- Endsley, M.R. (1988). Design and evaluation for situational awareness enhancement. *Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting*, pp. 97-101.
- Endsley, M. R. (1994). *A taxonomy of situation awareness errors*. Western European Association of Aviation Psychology 21st Conference. Ireland: Dublin.
- Endsley, M. R. (1995a). A taxonomy of situation awareness errors. In R. Fuller, N. Johnston, & N. McDonald (Eds.), *Human Factors in Aviation Operations* (pp. 287-292). Aldershot, England: Avebury Aviation, Ashgate Publishing Ltd.
- Endsley, M. R. (1995b). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors* 37(2), 381-394.
- Endsley, M. R. (1996). Automation and Situation Awareness. In R. Parasuraman & M. Mouloua (Hrsg.), *Automation and Human Performance: Theory and Application* (pp. 163-181). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Endsley, M. R. (1997). Level of Automation: Integrating humans and automated systems. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 41th annual meeting* (pp. 200-204).
- Endsley, M. R. (1999). Situation Awareness and Human Error. Designing to support Human Performance. *Proceedings of the High Consequence Systems Surety Conference*. Albuquerque, NM.

- Endsley, M. R. (2000). Theoretical underpinnings of situation awareness: a critical review. In M. R. Endsley & D. J. Garland (Eds.), *Situation awareness: analysis and measurement* (pp. 3-32). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Endsley, M. R. & Garland, D. J. (2000). Pilot Situation Awareness Training in General Aviation. *Proceedings of the 14th Triennial Congress of the International Ergonomics Association and the 44th Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*.
- Endsley, M. R., & Kaber, D. B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42(3), 462-492.
- Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors*, 37(2), 381-394.
- Endsley, M. R., & Rodgers, M. D. (1998). Distribution of attention, situation awareness, and workload in a passive air traffic control task: Implications for operational errors and automation. *Air Traffic Control Quarterly*, 6(1), 21-44.
- Endsley, M. R., & Smith, R. P. (1996). Attention distribution and decision making in tactical air combat. *Human Factors*, 38(2), 232-249.
- Ephrath, A. R., & Young, L. R. (1981). Monitoring vs. Man-in-the-Loop Detection of Aircraft Control Failures. In J. Rasmussen & W. B. Rouse (Eds.), *Human detection and diagnosis of system failures* (S. 143-154). New York: Plenum Press.
- Eyferth, K. (1995). Messung und Bewertung mentaler Beanspruchung in Mensch-Maschine-Systemen (MMS). In H.-P. Willumeit & H. Kolrep (Hrsg.), *Verlässlichkeit von Mensch-Maschine-Systemen. ZMMS-Spektrum*, Bd. 1 (S. 127-138). Berlin: Papyrus.
- Fahrenberg, J. (1979). Das Komplementaritätsprinzip in der psychophysiologischen Forschung und psychosomatischen Medizin. *Zeitschrift für Klinische Psychologie, Psychopathologie und Psychotherapie*, 27(2), 151-167.
- Fahrenberg, J. (1983). Psychophysiologische Methodik. In K. J. Groffmann & L. Michael (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie. Psychologische Diagnostik* (Bd. 4) (S. 1-192). Göttingen: Hogrefe.
- Fahrenberg, J., & Wientjes, C.J.E. (2000). Recording methods in applied environments. In R. W. Backs & W. Boucsein (Eds.), *Engineering Psychophysiology* (pp. 111-136). Mahwah NJ: Lawrence Erlbaum.
- Fancher, P. S., & Ervin, R. D. (1998). Adaptive Cruise Control Field Operational Test. *The UMTRI Research Review*, 29(4), 1-17.
- Fancher, P., Ervin, R., Sayer, J., Hagan, M., Bogard, S., Bareket, Z., Mefford, M., & Haugen, J. (1997). *Intelligent Cruise Control Field Operational Test (Interim Report)*. Technical Report UMTRI-97-11. University of Michigan: Transportation Research Institute.

- Fancher, P., Ervin, R., Sayer, J., Hagan, M., Bogard, S., Bareket, Z., Mefford, M., & Haugen, J. (1998). *Intelligent Cruise Control Field Operational Test (Final Report)*. Technical Report UMTRI-98-17. University of Michigan: Transportation Research Institute. DOT HS-808-849 (Volumes I and II of this report).
- Fastenmeier, W. (1995) (Hrsg.). *Autofahrer und Verkehrssituation: Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßensysteme*. Mensch-Fahrzeug-Umwelt, Bd. 33. Köln: Verlag TÜV Rheinland.
- Fastenmeier, W., & Gstalter, H. (2008). Anforderungsgerechtes Autofahren im Alter. In B. Schlag (Hrsg.), *Leistungsfähigkeit und Mobilität im Alter* (S. 37-64). Köln: TÜV Media GmbH.
- Feenstra, P., & Van der Horst, A. R. A (2006). Driver behaviour in motorway car-following transitions and driver support systems. *Proceedings of the ITS World Congress London*.
- Feldges, J., & Kanz, C. (2002). Haftungsrechtliche Aspekte von Fahrerassistenzsystemen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 3, 38-41.
- Fitts, P. M. (1951). *Human engineering for an effective air navigation and traffic control system*. Ohio State University Research Foundation Report. Columbus, OH.
- Flemisch, F. O. (2009). *EU-Projekt HAVEit. Highly Automated Vehicles – Intelligent Transportation*. Quelle im Internet: URL: <http://haveit.lighthouse.gr/LH2Uploads/ItemsContent/26/2009-02-13-HAVEit.pdf> (Stand: 01.07.2009).
- Flemisch, F. O., Adams, C. A., Conway, S. R., Goodrich, K. H., Palmer, M. T., & Schutte, P. C. (2003). *The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction* (NASA/TM-2003-2212672). Hampton, USA: Langley Research Center.
- Flemisch, F. O., Kelsch, J., Schieben, A., Schindler, J. Löper, Ch., & Schomerus, J. (2007). Prospective Engineering of Vehicle Automation with Design Metaphors: Intermediate Report from the H-Mode Projects. In M. Rötting & C. Steffens (Hrsg.), *Prospektive Gestaltung von Mensch-Technik-Interaktion*, 21 (25), 173-178. 7. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-System. VDI Verlag GmbH: Berlin.
- Flemisch, F. O., Schieben, A., Kelsch, J., & Löper, C. (2008). Automation spectrum, inner/outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation. In D. de Waard, F. O. Flemisch, B. Lorenz, H. Oberheid & K. A. Brookhuis (Eds.), *Human Factors for assistance and automation* (pp. 257-272). Maastricht: Shaker Publishing.
- Flemisch, F. O., Vollrath, M., & Rataj, J. (2007). Automation und Assistenz im PKW und LKW: Vielfalt oder Einheitlichkeit? In GZVB (Hrsg.), *AAET 2007 Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel* (S. 281-297). Braunschweig: GZVB.

- Foerster, F. Schneider, H. J., & Walschburger, P. (1983). The differentiation of individual-specific, stimulus-specific, and motivation-specific response pattern in activation processes. An inquiry investigating their stability and possible importance in psychophysiology. *Biological Psychology*, 17, 1-26.
- Fracker, M. L. (1988). *A theory of situation assessment: Implications for measuring situation awareness*. In Proceedings of the human factors society 32nd annual meeting (Vol. 1) (pp. 102-106). Santa Monica, CA: Human Factors Society.
- Frey, D., & Schultz-Hardt, S. (1996). *Eine Theorie zur gelernten Sorglosigkeit*. In M. Mandl (Hrsg.), Bericht über den 40. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie (S. 604-611). Göttingen: Hogrefe Verlag.
- Freyman, R. (2004). *Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenzsystemen und aktiven Sicherheitssystemen*. Tagung "Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz". Garching b. München, 11.-12. April.
- Fritz, N. (2006). *Schnittstelle Mensch-Technik: Untersuchung zur Fahrerreaktion bei verschiedenen Warnungen*. Dissertation, Universität Potsdam.
- Fuhrmann, K. H. (2006). Fahrerassistenzsysteme: Komfort und Sicherheit. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. VDI-Berichte, 1960* (19-34). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 37, 461-472.
- Funk, K., Lyall, B., Wilson, J., Vint, R., Niemczyk, M., Suroteguh, C., & Owen, G. (1999). Flight Deck Automation Issues. *The International Journal of Aviation Psychology*, 9(2), 109-123.
- Furedy, J. F. (1993). Electrodermal activity as a tool for differentiating psychological processes in human experimental preparations: focus on the psyche of psychophysiology. In J.-C. Roy, W. Boucsein, D. Fowles & J. Gruzelier (Eds.), *Progress in Electrodermal Research* (pp. 61-71). London: Plenum Press.
- Furukawa, H., Inagaki, T., Shiraishi, Y., & Watanabe, T. (2003). Mode awareness of a dual-mode adaptive cruise control system. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1, 832-837.
- Gaillard, A. W. K., & Kramer, A. F. (2000). Theoretical and methodological issues in psychophysiological research. In R. W. Backs & W. Boucsein (Eds.), *Engineering Psychophysiology. Issues and Applications*. Mahwah, USA: Erlbaum Publishers.
- Gardels, K. (1960). *Automatic Car Control for Electronic Highways*. Forschungsbericht. General Motors Research Laboratories, Warren, MI.
- Gasser, T. M. (2013). *Herausforderungen automatischen Fahrens und Forschungsschwerpunkte*. Tagung Fahrerassistenz, München.

- Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, Chr., Maurer, M. Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., & Vogt, W. (2012). *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Heft F83). Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- Gayko, J. (2009). Lane Departure Warning. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 543-553). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Gebhardt, A. (2000). *Werkzeuge für die schnelle Produktentwicklung* (2. Auflage). München: Carl Hanser Verlag.
- Gelau, C., & Bauer, A. (2004). *What do accident data tell about drivers' needs for assistance?* Vortrag anlässlich der „First Conference on Drivers Needs“ des EU Network of Excellence HUMANIST, Lissabon, Portugal, 03. – 04. Juni 2004.
- Gelau, C., Gasser, T. M., & Seeck, A. (2009). Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 24-32). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Geiser, G. (1985). Mensch – Maschine – Kommunikation im Kraftfahrzeug. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 87, 74 -77.
- Geyer, S. (2013). Entwicklung und Evaluierung eines kooperativen Interaktionskonzepts an Entscheidungspunkten für die teilautomatisierte, manöverbasierte Fahrzeugführung. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Fortschritt-Bericht VDI*, Reihe 12 (770). Dissertation. Technische Universität München. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Glaser, S. Vanholme, B., Mammar, S., Gruyer, D., & Nouvelière L. (2010). Maneuver-Based Trajectory Planning for Highly Autonomous Vehicles on Real Road With Traffic and Driver Interaction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(3).
- Godbole, D., & Lygeros, J. (1993). *Longitudinal Control of the Lead Car of a Platoon / Institute of Transportation Studies*. Forschungsbericht. Berkeley: University of California.
- Godthelp, H., Milgram, P., & Blaauw, G. J. (1984). The development of a time-related measure to describe driving strategy. *Human Factors*, 26(3), 257-268.
- Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L., & Bengler, K. (2013). „Take over!“ How long does it take to get the driver back into the loop? In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 57 (pp. 1938–1942).
- Goldstein, E. B. (2002). *Wahrnehmungspsychologie – Eine Einführung* (2. Auflage). Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Grimmer, W., Adelt, P. J., & Stephan, E. R. (1995). *Die Akzeptanz von Navigations- und Verkehrsführungssystemen der Zukunft*. Eine AXA Direkt Verkehrsstudie. Bonn: Deutscher Psychologen Verlag.

- Grote, G., Weik, S., Wäfler T., & Zölch, M. (1995). Complementary allocation of functions in automated work systems. In Y. Anzai, K. Ogawa & H. Mori (Eds.), *Symbiosis of Human and Artifact*. Amsterdam: Elsevier.
- Gründl, M. (2005). *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation, Universität Regensburg.
- Gruner, K. E. (1997). *Kundeneinbindung in den Produktinnovationsprozess*. Gabler Verlag.
- Gugerty, L. J. (1997). Situation awareness during driving: explicit and implicit knowledge in dynamic spatial memory. *Journal of Experimental Psychology Applied*, 3, 42-66.
- Gugerty, L. J. (1998). Evidence from a partial report task for forgetting in dynamic spatial memory. *Human Factors*, 40 (3), 498-508.
- Gugerty, L. J., & Tirre, W. (1997). *Situation awareness: a validation study and investigation of individual differences*. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 40<sup>th</sup> Annual Meetings (pp. 564-568). Santa Monica, CA.
- Gutwin, C. (1997). *Workspace Awareness in Real-Time Distributed Groupware*. PhD thesis, Department of Computer Science, The University of Calgary, Alberta, Kanada.
- Hackenberg, L., Bendewald, L., Othersen, I. & Bongartz, S. (2013). *Licht oder Sound? Evaluation von diffusen Modalitäten zur Fahrerunterstützung während des teilautomatisierten Fahrens*. 16. Kongress: Elektronik im Fahrzeug. Baden-Baden.
- Hacker, W. (1973). *Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie. Psychische Struktur und Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Hacker, W. (1996). Handlungsleitende psychische Abbilder. In J. Kuhl & H. Heckhausen (Hrsg), *Motivation, Volition und Handlung. Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich C, Serie IV* (Band 4, S. 769-794). Göttingen: Hogrefe.
- Hacker, W. (1998). Fehlhandlungen und Handlungsfehler. In W. Hacker (Hrsg.), *Allgemeine Arbeitspsychologie. Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten* (S. 665-716). Bern: Huber.
- Häring, J., Wilhelm, U., & Branz, W. (2009). Entwicklungsstrategie für Kollisionswarnsysteme im Niedrigpreis-Segment. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 03, 182-186.
- Hakuli, S., Bruder, R., Flemisch, F. O., Löper, C., Rausch, H., Schreiber, M., & Winner, H. (2009). Kooperative Automation. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S.647-656). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Haller, R. (2001). Fahrer-Bevormundung: Wie erreicht man, dass der Fahrer Herr der Situation bleibt? In Th. Jürgensohn & K.-P. Timpe (Hrsg.), *Kraftfahrzeugführung* (S. 31-38). Berlin: Springer.
- Hancock, P. A., & Scallen, S. F. (1996). The future of function allocation. *Ergonomics in Design*, 24-29.

- Harel, D. (1987). Statecharts: A visual formalism for complex systems. *Science of Computer Programming*, 8, 231-274.
- Harel, D. (1988). On visual formalisms. *Communications of the ACM*, 31(5), 514-530.
- Hartman, B. O., & Secrist, G. E. (1991). Situational awareness is more than exceptional vision. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 62, 1084-1089.
- Harwood, K., Barnett, B., & Wickens, C. (1988). *Situational awareness: A conceptual and methodological framework*. In *Proceedings of the Psychology in the Department of Defense Eleventh Symposium* (Tech. Report No. USAFA-TR-88-1, pp. 316-320). Colorado Springs, CO: US Air Force Academy (AD-A198723).
- Hatfield, J., & Fernandes, R. (2009). The role of risk-propensity in the risky driving of younger drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 41(1), 25-35.
- Hauß, Y., & Timpe, K.-P. (2002). Automatisierung und Unterstützung im Mensch-Maschine-System. In K.-P. Timpe & H. Kolrep (Hrsg.), *Mensch-Maschine-Systemtechnik - Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation* (S. 41-62). Düsseldorf: Symposion.
- Heesen, M., Kelsch, J., Löper, C., & Flemisch, F. (2010) Haptisch-multimodale Interaktion für hochautomatisierte, kooperative Fahrzeugführung bei Fahrstreifenwechsel-, Brems- und Ausweichmanövern. In GZVB (Hrsg.), *AAET 200 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig: GZVB.
- Heißing, B. (2006). *Grundlagen des Kraftfahrzeugbaus*. Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. TU München, Umdruck zur Vorlesung 2006.
- Heißing, B., & Ersoy, M. (2007) (Hrsg.). *Fahrwerkhandbuch. Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven* (1. Auflage). Wiesbaden: Vieweg Verlag.
- Helander, M. (1978). Applicability of driver's electrodermal response to the design of the traffic environment. *Journal of Applied Psychology*, 63 (4), 481-488.
- Heller, O. (1985). Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung (KU). *Psychologische Beiträge*, 27, 478-493.
- Helmer, T., Schweigert, M., Lindberg, T., & Bubb, H. (2008). Erwartungsbasierte Gruppierung von Fahrerassistenzsystemen aus Sicht des Fahrers. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. 24. Internationale VDI/VW Gemeinschaftstagung*. Braunschweig: VDI-Verlag GmbH.
- Herczeg, M. (2004). *Software-Ergonomie* (2. Aufl.). München: Oldenbourg.
- Herczeg, M. (2006). *Interaktionsdesign*. München: Oldenbourg.
- Hering, K. (1999). *Situationsabhängiges Verfahren zur standardisierten Messung der kognitiven Beanspruchung im Straßenverkehr. Literaturübersicht und empirische Felduntersuchung*. Dissertation, Universität Köln.

- Hesse, T., Engström, J., Johansson, E., Varalda, G., Brockmann, M., Rambaldini, A., Fricke, N., Flemisch, F., Köster, F., & Kanstrup, L. (2011). *Towards User-Centred Development of Integrated Information, Warning, and Intervention Strategies for Multiple ADAS in the EU Project interactIVe*. In C. Stephanidis (Ed.), *Universal Access in Human - Computer Interaction* (pp. 280- 289). Berlin: Springer.
- Hockey, G. R. J. (1997). Compensatory Control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitiveenergetical framework. *Biological Psychology*, 45, 73-93.
- Hoedemaeker, M., & Brookhuis, K. A. (1998). Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC). *Transportation Research, Part F*, 1, 95-106.
- Hörhold, M. (1994). *Zur Psychophysiologie der Belastungsregulation. Verlaufsanalysen zum Einfluss psychologischer versus physikalischer Situationsmerkmale und psychologischer versus physiologischer Personenmerkmale*. Frankfurt/M., Berlin, Bern: P. Lang – Europäischer Verlag der Wissenschaften.
- Hoffmann, S., Krüger, H.-P., & Buld, S. (2003). Vermeidung von Simulator Sickness anhand eines Trainings zur Gewöhnung an die Fahrsituation. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Simulation und Simulatoren – Mobilität virtuell gestalten, VDI-Berichte, 1745*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Hogema, J. H., van Arem, B., Smulders, S. A., & Coemet, M. J. (1997). Modelling Changes in Driving Behaviour: On the Effects of Autonomous Intelligent Cruise Control. In T. Rothengatter & E. C. Vaya (Eds.), *Traffic and Transport Psychology: Theory and Application* (pp. 237-246). Amsterdam, New York: Pergamon.
- Hogema, J., Van der Horst, A., & Jansen, W. (1994). A simulator evaluation of different forms of intelligent cruise control (TNO Report, TNO-TM 1994 C-30). Soesterberg: TNO Human Factors Research Institute.
- Holzmann, F. (2007). *Die Kooperative Anpassung zwischen dem Fahrer und der sicherheitsrelevanten Integration von Assistenzsystemen in Form eines virtuellen Fahrers*. In 8. Braunschweiger Symposium Automatisierung-, Assistenz- und eingebettete Systeme für Transportmittel (S. 40-51).
- Holzmann, F., Bellino, M., Kolski, S., Sulzmann, A., Spiegelberg, G., & Siegwart, R. (2005). *Robots go automotive - The SPARC approach*. In Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, S. 478–483. Las Vegas, Nevada.
- Homann, K. (2005). Wirtschaft und gesellschaftliche Akzeptanz: Fahrerassistenzsysteme auf dem Prüfstand. In M. Maurer, & C. Stiller (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (S. 239-244). Berlin: Springer.



- Hong, I. Kurihara, T., & Iwasaki, M. (2007). Older drivers' perceptions, responses, and driving behaviours during complex traffic conditions at a signalized intersection. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering Part D*, 222(11), 2063-2076.
- Horiguchi, Y., Fukuju, R., & Sawaragi, T. (2006). *An Estimation Method of Possible Mode Confusion in Human Work with Automated Control Systems*. SICE-ICASE International Joint Conference, IEEE Conference Publications, 943-948, Oct. 18-21, Bexco, Busan, Korea.
- Hoyos, C.G. (1990). Menschliches Handeln in technischen Systemen. In C. G. Hoyos & B. Zimolong (Hrsg.), *Ingenieurpsychologie. Enzyklopädie der Psychologie Serie III*, Band 2. Göttingen: Verlag für Psychologie.
- Hoyos, C. G., Fastenmeier, W., & Gstalter, H. (1995). Forderungen an eine verhaltensorientierte Verkehrssicherheitsarbeit. In: W. Fastenmeier (Hrsg.), *Autofahrer und Verkehrssituation: Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme* (S. 11-26). Köln: TÜV Rheinland.
- Inagaki, T. (2003). Adaptive automation: Sharing and trading of control. In E. Hollnagel (Ed.), *Handbook of cognitive task design* (pp. 221–245). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Ioannou, P. (1997). *Automated Highway Systems*. New York: Plenum Press.
- Jenner, T. (2000). *Überlegungen zur Integration von Kunden in das Innovationsmanagement*. GfK-Jahrbuch der Absatz- und Verbraucherforschung, 2, 130-147.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness*. Cambridge: Cambridge University.
- Jones, D. G. (1997). *Reducing situation awareness errors in air traffic control*. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 41st Annual Meeting (pp. 230-233). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Jones, D.G., & Endsley, M. (1996). *Sources of situation awareness errors in aviation*. *Aviation Space Environment MD*, 67(6), 507-512.
- Jones, P. M., Chu, R. W., & Mitchell, C. M. (1995). A methodology for human-machine systems research: Knowledge engineering, modeling, and simulation. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 25(7), 1025-1038.
- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (1997). Out-of-the-Loop Performance Problems and the Use of Intermediate Levels of Automation for Improved Control System Functioning and Safety. *Process Safety Progress*, 16(3), 126-131.
- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (2003). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomic Science*, 3, 1-40.

- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(2), 113–153.
- Kahneman, D. (1973). *Attentions and Effort*. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall.
- Kantowitz, B. H., & Sorkin, R. D. (1983). *Human factors: Understanding people-system relationship*. New York: John Wiley & Sons.
- Karasek, R. A., & Theorell, T. (1990). *Healthy work, stress, productivity, and the reconstruction of working life*. New York: Basic Books.
- Kassner, A., & Vollrath, M. (2006). Akzeptanzmessung als Baustein für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. *VDI-Berichte*, 1960 (97-112). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Kastner, R., Michalke, T., Adamy, J., Fritsch, J., & Goerick, C (2011). Task-based environment interpretation and system architecture for next generation ADAS. *IEEE Intelligent Transportations Systems Magazine*, 3(4), 20-33.
- Katzenmeier, C. (2003). Entwicklungen des Produkthaftungsrechts. *Juristische Schulung*, 10, 943-951.
- Katzwinkel, R., Auer, R., Brosig, S., Rohlf, M., Schöning, V., Schroyen, F., Schwitters, F., & Wuttke, U. (2009). Einparkassistent. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 471-477). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Kaussner, A., Buld, S., & Krüger, H.-P. (2000). *Meilensteinbericht: Bereitstellung verschiedener Assistenzsysteme in der Simulation*. Unveröffentlichter EMPHASIS-Bericht. Würzburg: Universität Würzburg.
- Kazi, T. A., Stanton, N. A., Walker, G. H., & Young, M. S. (2007). Designer driving: drivers' conceptual models and level of trust in adaptive cruise control. *International Journal of Vehicle Design*, 45(3), 339–360.
- Kempen, B. (2008): *Fahrerassistenz und Wiener Weltabkommen*. Vortrag auf dem 3. Sachverständigentag, 25. und 26. Feb. 2008. Quelle im Internet: URL: [http://www.sachverstaendigentag21.de/svt2008/downloads/2.\\_Vertrag\\_-\\_Prof.\\_Kempen\\_-\\_Praesentation.pdf](http://www.sachverstaendigentag21.de/svt2008/downloads/2._Vertrag_-_Prof._Kempen_-_Praesentation.pdf). (Stand: 17.10.2011).
- Keskinen, E. (1996). *Why do young drivers have more accidents?* Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Mensch und Sicherheit, Heft M52. Bergisch Gladbach.
- Kessel, C. J., & Wickens, C. D. (1982). The transfer of failure-detection skills between monitoring and controlling dynamic systems. *Human Factors*, 24(1), 49-60.
- Khanh, T. Q., & Huhn, W. (2009). Sichtverbesserungssysteme. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 448-470). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

- Kinney, G. C., Spahn, M. J., & Amato, R. A. (1977). *The human element in air traffic control: Observations and analyses of the performance of controllers and supervisors in providing ATC separation services* (MTR-7655). McLean, VA: METREK Division, MITRE Corporation.
- Kintsch, W. (1998) *Comprehension: A paradigm for cognition*. New York: Cambridge University Press.
- Kirlik, A. (1995). Requirements for psychological models to support design: Toward ecological task analysis. In J. M. Flach, P. A. Hancock, J. K. Caird & K. J. Vicente (Ed.), *An ecological approach to human machine systems I: A global perspective*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Klatzky, R. L. (1984). *Memory and awareness. An information-processing perspective*. New York, NY: W.H. Freeman and Company.
- Klein, G. A. (1989). Recognition-primed decisions. In W. B. Rouse (Ed.), *Advances in man-machine systems research*, 5, 47-92. Greenwich, Conn: JAI Press, Inc.
- Klein, G., Moon, B. M., & Hoffmann, R.R. (2006). Making Sense of Sensemaking 1: Alternative Perspectives. *IEEE INTELLIGENT SYSTEMS*, 21(4), 70-73.
- Kleine-Besten, T., Kersken, U., Pöchmüller, W., & Schepers, H. (2009). Navigation und Telematik. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 599-624). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Kluwe, R. H., & Haider, H. (1990). Modelle zur internen Repräsentation komplexer technischer Systeme. *Sprache & Kognition*, 9, 173-192.
- König, W. (2009). Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 33-42). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Kolbig, M., & Müller, S. (2013). Mode Awareness im Fahrkontext: Eine theoretische Betrachtung. 10. Berliner Werkstatt *Mensch-Maschine-Systeme. Grundlagen und Anwendungen der Mensch-Maschine-Interaktion*, S.15-22.
- Kompaß, K. (2008). Fahrerassistenzsysteme der Zukunft - auf dem Weg zum autonomen Pkw? In V. Schindler & I. Sievers (Hrsg.), *Forschung für das Auto von morgen. Aus Tradition entsteht Zukunft* (S. 261–286). Berlin: Springer.
- Kramer, A. F. (1993). Physiological metrics of Mental Workload: A Review of recent progress. *Psychophysiology of Mental Workload. (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, Sonderschrift 2)*, 2-34.
- Kraiss, K. F. (2004). *Anthropotechnik in der Fahrzeug- und Prozessführung*. Vorlesungsskript der RWTH Aachen am Lehrstuhl für Technische Informatik.
- Krause, J. (1992). Computer-Talk-Merkmale in den USL-Studien. In J. Krause & L. Hitzemberger (Hrsg.), *Sprache und Computer, Computer Talk*. (S. 30-61). Hildesheim: Olms.

- Krüger, H. P. (1977). Simultane V-Tests zur exakten Prüfung von Haupt- und Wechselwirkungen an  $2^2$  - faktoriellen Versuchsplänen. *Psychologische Beiträge*, 19, 110-120.
- Kussmann, H., Modler, H., Engstrom, J., Agnvall, A., Piamonte, P., Markkula's, G., Amiditis, A., Bolovinou, A., Andreone, L., Deregibus, E., Kompfner, P., Robertson, P., De Miguel Garcia, N., Feron, S., Berninger, H., Couvreur, Ch., Bellet, T., Scholliers, J., & Kutila, M. (2010). *Requirements for AIDE HMI and safety functions*. Forschungsbericht, IST-1-507674-IP.
- Lacey, J. I. (1967). Somatic response patterning and stress: Some revisions of activation theory. In M. Appley & R. Trumbull (Eds.). *Psychological stress: Issues in research*. New York: Appleton Century Crofts.
- Lamme, V. A. F. (2000). Neural Mechanism of visual awareness: A linking proposition. *Brain and Mind*, 1, 385-406.
- Landau, K., & Weiße, J. (2001). *SANTOS-Meilensteine Arbeitsphase 5 „Erprobung“ (Teil 1)*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt – Institut für Arbeitswissenschaft.
- Lange, C. (2007). *Fahrerverhalten*. In C. Lange, M. Gründl, M. & M. Tönnis, M. (Hrsg.), Abschlussbericht zum Kooperationsprojekt TUMMIC - Mensch Maschine Interaktion im Fahrzeug Phase IV - Fahrerantizipation.
- Lange, C. (2008). *Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades*. Dissertation, Technische Universität München.
- Lange, A., Maas, M., Albert, M., Siedersberger, K.-H. & Bengler, K. (2014). Automatisiertes Fahren – So komfortabel wie möglich, so dynamisch wie nötig. Vestibuläre Zustandsrückmeldung beim automatisierten Fahren. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Lasky, T.A., & Ravani, B. (1993). *A Review of Research Related to Automated Highway Systems (AHS)*. Interim Report for Federal Highway Administration (DTFH61-93-C-00189). University of California.
- Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). *Stress, Appraisal, and Coping*. New York: Springer.
- Lee, J. D., McGehee, D. V., Brown, T. L., & Reyes, M. L. (2002). Collision Warning Timing, Driver Distraction, and Driver Response to Imminent Rear-End Collisions in a High-Fidelity Driving Simulator. *Human Factors*, 44(2), 314-334.
- Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors*, 46(1), 50-80.
- Lefcourt, H. M. (1982). *Locus of control: Current trends in theory and research*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- Leveson, N. G., & Palmer, E. (1997). Designing automation to reduce operator errors. *Proceedings of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Conference*.

- Leveson, N., Pinnel, L. D., Sandys, S. D., Koga, S., & Reese, J. D. (1997). Analyzing Software Specifications for Mode Confusion Potential. In C. W. Johnson (Ed.), *Proceedings of a Workshop on Human Error and System Development* (pp. 132-146), Glasgow, Scotland.
- Levitan, A. L., Burrus, M., Dewing, W. L., Reinhart, W. F., & Llaneras, V. P. B. R. E. (1998). *Preliminary Human Factors Guidelines for Automated Highway System Designers* (Second Edition). Georgetown Pike: Federal Highway Administration.
- Lienkamp, M., & Bartels, A. (2009). *Automatisches Fahren: Logische Konsequenz der Assistenzsysteme oder Utopie*. In 1. Automobiltechnisches Kolloquium München.
- Lindberg, T., Schaller, T., & Gardenegger, B. (2007). Stauassistentz - Unterstützung des Fahrers durch Übernahme der Quer- und Längsführung im Stau. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Fahrer im 21. Jahrhundert. VDI-Berichte, 2015 (29-42)*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Lindberg, T., Tönert, L., Rötting, M., & Bengler, K. (2009). Integration aktueller und zukünftiger Fahrerassistenzsysteme – wie lässt sich der Lösungsraum für die HMI-Entwicklung strukturieren? *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme. 8. Berliner Werkstatt - Mensch-Maschine-Systeme*. (S. 187-188). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Lindholm, E., & Cheatham, C. M. (1983). Autonomic activity and workload during learning of a simulated aircraft carrier landing task. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 54, 435-439.
- Liu, Y.-C. (2001). Comparative study of the effects of auditory, visual and multimodality displays on drivers' performance in advanced traveller information systems. *Ergonomics*, 44(4), 425-442.
- Lüdtke, A., & Möbus, C. (2002). Prognose von Bedienungsfehlern durch Simulation der Entstehung gelernter Sorglosigkeit bei der Pilot-Cockpit Interaktion. In M. Grandt & K.-P. Gärtner (Hrsg.), *Situation Awareness in der Fahrzeug- und Prozessführung* (S. 163-180). Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft und Raumfahrt e.V..
- Luczak, H. (1987). Psychophysiologische Methoden zur Erfassung psychophysiologischer Beanspruchungszustände. In U. Kleinbeck & J. Rutenfranz (Hrsg.), *Arbeitspsychologie. Enzyklopädie der Psychologie* (Bd. D III, 1) (S. 185-259). Göttingen: Hogrefe.
- Lutz, L. S: (2014). *Rechtliche Hürden auf dem Weg zu autonomen Fahrzeugen*. Quelle im Internet: URL: <http://www.heise.de/tp/artikel/41/41393/3.html> (Stand: 28.11.2014).
- Löper, C., Kelsch, J., & Flemisch, F. O. (2008). Kooperative, manöverbasierte Automation und Arbitrierung als Bausteine für hochautomatisiertes Fahren. *Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, 215-237.

- Lorenz, B., Di Nocera, F., Röttger, S., & Parasuraman, R. (2001). The effects of level of automation on the out-of-the-loop unfamiliarity in a complex dynamic fault-management task during simulated spaceflight operations. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 45(2), 44–48.
- Lorenz, L., Kerschbaum, P. & Schumann, J. (2014). Designing take over scenarios for automated driving. How does augmented reality support the driver to get back into the loop? In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 58, 1681-1685.
- Lykken, D. T., Rose, R., Luther, B., & Maley, M. (1966). Correcting psychophysiological measures for individual differences in range. *Psychological Bulletin*, 66, 481-484.
- Ma, R., & Kaber, D.B. (2005). Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, 939-953.
- Mäkinen, T., Amditis, A., Appenrodt, N., Beutner, A., Blervaque, V., Fürstenberg, K., Herzog, H.-J., Irion, J., Miglietta, M., Noecker, G., Saroldi, A., Schulze, M., Schwartz, J., Tango, F., Wertheimer, R., & Vogel, K. (2005). *Requirements for Preventive Safety Applications*. PReVENT IP Deliverable IP\_D4. Quelle im Internet: URL: [www.prevent-ip.org/download/deliverables/IP\\_Level/PR06000-IPD-050315-v40-VTT-IP%20deliverable%20D4\\_final.pdf](http://www.prevent-ip.org/download/deliverables/IP_Level/PR06000-IPD-050315-v40-VTT-IP%20deliverable%20D4_final.pdf) (Stand: 03.08.2009).
- Mayer, R. E. (1997). From Novice to Expert. In M. Helander, T. K. Landauer & P. Prabhu (Eds.), *Handbook of Human-Computer Interaction* (2nd edition, pp. 49-63). New York: Elsevier Science.
- Manzey, D. (1998). Psychophysiologie mentaler Beanspruchung. In F. Rösler (Hrsg.), *Ergebnisse und Anwendungen der Psychophysiologie* (Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich C, Serie I, Band 5) (S. 799-864). Göttingen: Hogrefe.
- Manzey, D. (2008). Systemgestaltung und Automatisierung. In P. Badke-Schraub, G. Höfninger & K. Lauche (Hrsg.), *Human Factors: Psychologie sicheren Handelns in Risikobereichen* (S. 307-324). Heidelberg: Springer Verlag.
- Manzey, D., & Bahner, J. E. (2005). Vertrauen in die Automation als Aspekt der Verlässlichkeit von Mensch-Maschine-Systemen. In K. Karrer, B. Gauss & C. Steffens (Hrsg.), *Beiträge zur Mensch-Maschine-Systemtechnik aus Forschung und Praxis: Festschrift für Klaus-Peter Timpe* (S. 93-109). Düsseldorf: Symposium.
- Martens, M., Pauwelussen, J., Schieben, A., Flemisch, F. O., Merat, N., Jamson, S., & Caci, P. (2007). Human Factors' aspects in automated and semi-automated transport systems: State of the art. *City Mobil Deliverable 3.2.1*, EU DG Research.

- Maurer, M. (2009). Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 43-54). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- McGwin Jr., G., Sims, R.V., Pulley, L., & Roseman, J. M. (2000). Relations among chronic medical conditions, medications, and automobile crashes in the elderly: a population-based case-control study. *American Journal of Epidemiology*, 152(5), 424-431.
- McQueen, B., & Catling, I. (1991). The development of IVHS in Europe. In Society of Automotive Engineers (Ed.) *IVHS and Vehicle Communications*, 31-42.
- Merat, N., & Jamson, H. (2009). Is drivers' situation awareness influenced by a fully automated driving scenario? *Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter conference*. Soesterberg, The Netherlands.
- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C. H., & Carsten, O. (2012). Highly Automated Driving, Secondary Task Performance, and Driver State. In *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54(5), 762-771.
- Minsky, M. L. (1967). *Computation: Finite and infinite machines*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Minsky, A. (1975). A framework for representing knowledge. In P. H. Winston (Ed.), *The Psychology of Computer Vision* (S. 211-277). New York, McGraw-Hill.
- Mogford, R. H. (1997). Mental models and situation awareness in air traffic control. *International Journal of Aviation Psychology*, 7(4), 331-342.
- Mogford, R. H., & Tansley, B. W. (1991). The importance of the air traffic controller's mental model. *Human Factors Society of Canada Annual Meeting*. Canada.
- Monk, A. (1986). Mode errors: a user-centered analysis and some preventative measures using keying-contingent sound. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24, 313-327.
- Moray, N., Inagaki, T., & Itoh, M. (2000). Situation adaptive automation, trust and self-confidence in fault management of time-critical tasks. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6(1), 44-58.
- Mühlbacher, S. (2003). *Konzepte zur sicheren Bedienung von Fahrerassistenzsystemen. Eine Teilstudie des Projekts INVENT*. Magisterarbeit, Universität Regensburg.
- Müller, N. (1996). Autonomes Manövrieren und Navigieren mit einem sehenden Straßenfahrzeug. Dissertation. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *VDI-Fortschritt-Berichte*, 218. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Muir, B. M., & Morray, N. (1996). Trust in automation. Part 2. Experimental studies of trust and human intervention in automated systems. *Ergonomics*, 37, 1905-1922.
- Mulder, L. J. M. (1988). *Assessment of cardiovascular reactivity by means of spectral analysis*. Unpublished dissertation. Rijksuniversiteit Groningen, Netherlands.

- Mulder, L. J. M. & Mulder, G. (1987). Cardiovascular reactivity and mental workload. In O. Rompelmann & R. I. Kitney (Eds.), *The Beat-by-Beat Investigation of Cardiovascular Function* (pp. 216-253). Oxford: Oxford University Press.
- Mummendey, H. D. (2003). *Die Fragebogen-Methode. Grundlagen und Anwendung in Persönlichkeits-, Einstellungs- und Selbstkonzeptforschung* (4. unveränderte Auflage). Göttingen: Hogrefe.
- Naab, K., & Reichart, G. (1994). Driver Assistance Systems for Lateral and Longitudinal Vehicle Guidance – Heading Control and Active Cruise Control. *Proceedings of the Int. Symposium on Advanced Vehicle Control, AVEC 94*, Tsukuba, Japan.
- Näätänen, R., & Summala, H. (1976). *Road user behaviour and traffic accidents*. Amsterdam: North Holland.
- Neukum, A., Lübbecke, T., Krüger, H.-P., Mayser, C., & Steinle, J. (2008). ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS 2008* (S. 141-150). Karlsruhe: fmrt.
- Neuss, R. (2000). *Usability Engineering als Ansatz zum Multimodalen Mensch-Maschine-Dialog*. Dissertation, Technische Universität München.
- NHTSA (2007). *FMVSS No. 126 Electronic Stability Control Systems*. Quelle im Internet: URL: [http://www.nhtsa.dot.gov/staticfiles/DOT/NHTSA/Rulemaking/Rules/Associated%20Files/ESC\\_FRIA\\_%2003\\_2007.pdf](http://www.nhtsa.dot.gov/staticfiles/DOT/NHTSA/Rulemaking/Rules/Associated%20Files/ESC_FRIA_%2003_2007.pdf) (Stand: 10.08.2010)
- Niederée, U., & Vollrath, M. (2009). Fahrerassistenzsysteme der Zukunft - Fährt da der Mensch noch mit? In VDI (Hrsg.) *Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit* (S. 193-205). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. New York: Academic Press.
- Nilsson, I. (1995). Safety Effects of Adaptive Cruise Controls in Critical Traffic Situations. 2. *World Congress On Intelligent Transport Systems*, Yokohama.
- Nilsson, L., & Näbo, A. (1994). Evaluation of Application 3: Intelligent Cruise Control Simulator Experiment. Effects of Different Levels of Automation on Driver Behaviour, Workload and Attitudes. *VTI Särtryck, 266*. Linköping, Sweden.
- Nirschl, G., & Kopf, M. (1997). Untersuchung des Zusammenwirkens zwischen dem Fahrer und einem ACC-System in Grenzsituationen. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Der Mensch im Verkehr. VDI-Berichte, 1317* (119-147). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Nöcker, G., Mezger, K., & Kerner, B. (2005). Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme, In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *3. Workshop Fahrerassistenzsysteme, FAS 2005* (S. 151–163) Waltling (im Altmühltal).
- Norman, D. A. (1981). Categorization of action slipes. *Psychological Review*, 88(1), 1-15.
- Norman, D. A. (1983a). Design rules based on analysis of human error. *Communication of the ACM*, 26(4), 254-258.



- Norman, D. A. (1983b). Some observations on mental models. In D. Gentner & A. L. Stevens (Hrsg.), *Mental Models* (S. 7-14). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Norman, D. A. (1984). Stages and levels in human-machine interaction. *International Journal of Man-machine Studies*, 21, 365-375.
- Norman, D. A. (1986). Cognitive engineering. In D. A. Norman & S. W. Draper (Eds.), *User centered system design. New perspectives on humancomputer interaction* (pp. 31-61). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Norman, D. A. (1988). *The psychology of everyday things*. New York: Basic Books.
- Norman, D. A. (1989). *The design of everyday things*. New York: Basic Books.
- Norman, D. A. (1990). The problem with automation. Inappropriate feedback and interaction not over-automation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 327, 585-593.
- Norman, D. A., & Bobrow, D. (1975). In data-limited and ressource-limited processes. *Journal Cognitive Psychology*, 7, 44-64.
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of Behaviour. In R.J. Davidson, G.E. Schwartz & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and Self-Regulation: Advances in Research* (Vol. IV). New York: Plenum.
- Norman, S. D., & Orlady, H. W. (1989). (Eds.). *Flight deck automation: Promises and realities*. Moffett Field, California: National Aviation and Space Administration.
- OECD (1990). *Behavioural adaptations to changes in the road transport system*. Paris: OECD expert group.
- Ohlemüller, W. (2009). Kontrollüberzeugungen als Prädiktor für subjektive Systembewertungen. In A. Lichtenstein, C. Stöbel & C. Clemens (Hrsg.), *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme. 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*, 189-193. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Oshima N. (2001). Direct reception of light by chromatophores of lower vertebrates. *Pigment Cell Res.* 14, 312–319.
- Othersen, I., Hackenberg, L. & Petermann-Stock, I. (2013). Vom Fahrer zum Überwacher/Teilzeitpassagier – Eine Analyse des teilautomatisierten Fahrens. 55. *Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TeaP)*.
- Othersen, I., Petermann-Stock, I., Hackenberg, L. & Bendewald, L. (2013). Driver as Supervisor - An Analysis of Partly Automated Driving. 6. *Tagung Fahrerassistenzsysteme. Der Weg zum automatischen Fahren*.
- Othersen, I., Petermann-Stock, I. & Vollrath, M. (2014). Bitte überwachen! - Eine Analyse des teilautomatisierten Fahrens. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.

- Özgüner, Ü., Baertlein, B., Cavallo, C., Farkas, D., Hatipoglu, C., Lytle, S., Martin, J., Paynter, F., Redmill, K., Schneider, S., Walton, E., & Young, J. (1997). The OSU Demo '97 Vehicle. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- Palmer, E. A. (1995). "Oops, it didn't arm" - A case study of two automation surprises. In R. S. Jensen (Ed.), *Proceedings of the Eighth International Aviation Psychology Symposium Conference*. Columbus, OH: The Ohio State University.
- Pander, J. (2013). *Auftritt der Autopiloten – Messe Blog IAA*. Quelle im Internet: URL: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/iaa-blog-juergen-pander-ueber-autonomes-fahren-a-922137.html> (Stand: 17.09.2014).
- Parasuraman, R., Bahri, T., Deaton, J. E., Morrison, J. G., & Barnes, M. (1992). Theory and design of adaptive automation in aviation systems. *Naval Air Warfare Center, Aircraft Division, Warminster, PA, Progress Report No. NAWCADWAR-92033-60*.
- Parasuraman, R., Molloy, R., & Singh, I. L. (1993). Performance Consequences of Automation-Induced "Complacency". *The international journal of aviation psychology*, 3(1), 1-23.
- Parasuraman, R., Molly, R. Mouloua, M., & Hilburn, B. (1996). Monitoring of automated systems. In R. Parasuraman & M. Mouloua (Eds.), *Automation and human performance: Theory and applications* (pp. 91-115). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Parasuraman, R., & Mouloua, M. (1996). *Automation and human performance: Theory and applications*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Parasuraman, R., Mouloua, M., & Molloy, R. (1994). Monitoring automation failures in human-machine systems. In M. Mouloua & R. Parasuraman (Eds.), *Human performance in automated systems: Current research and trends* (pp. 45-49). Hillsdale, NJ. LEA.
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors*, 39 (2), 230-253.
- Parasuraman, R., Sheridan, Th. B., & Wickens, Ch. D. (2000). A model for Types and Levels of Human Interaction with Automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 30, 286-297.
- Pauwelussen, J. & Minderhoud, M. (2008). The effects of deactivation and (re)activation of ACC on driver behaviour analyzed in real traffic. In *Intelligent Vehicle, IEEE Symposium - IV*, pp. 257-262.
- Peissner, M., Heidmann, F., & Ziegler, J. (2001). Simulating Recognition Errors in Speech User Interface Prototyping. In M. J. Smith, et al. (Hrsg.), *Usability evaluation and interface design. Proceedings of HCI International*, (Vol. 1, S. 233-237). Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum.

- Petermann, I., & Kiss, M. (2009). Die Rolle des Fahrers im Spektrum von Automation und Transition. Nutzerzentrierte Gestaltung von Übergabe- und Übernahmeprozessen zwischen Fahrer und drei aufeinander aufbauenden Automationsstufen. In VDI Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* (VDI-Berichte, Nr. 2085, S. 153-166). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Petermann, I., & Schlag, B. (2010). Auswirkung der Synthese von Assistenz und Automation auf das Fahrer-Fahrzeug-System. *AAET 2010 Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, 383–403.
- Petermann-Stock, I., & Rhede, J. (2013). Intelligente Strategien für nutzerzentrierte MMI Konzepte im urbanen Raum. In VDI Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert VDI-Berichte, 2205*, (263-286). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Petermann-Stock, I., Hackenberg, L., Muhr, T., & Mergl, C. (2013). Wie lange braucht der Fahrer? Eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Staufahrt. *6. Tagung Fahrerassistenzsysteme. Der Weg zum automatischen Fahren*.
- Petermann-Stock, I., Hackenberg, L., Muhr, T., Josten, J. & Eckstein, L. (2015). „Bitte übernehmen Sie das Fahren!“ Ein multimodaler Vergleich von Übernahmestrategien. *AAET 2015 Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*.
- Peters, B. (1996). Evaluation of an Adaptive Cruise Control (ACC) System used by Drivers with Lower Limb Impairments. *3. World Congress on Intelligent Transport Systems*. Orlando, USA.
- Peters, B., & Nilsson, L. (2007). Modelling the Driver in Control. In P. C. Cacciabue (Hrsg.), *Modelling the Driver Behaviour in Automotive Environments. Critical Issues in Driver Interactions with Intelligent Transport Systems* (S. 85-104). London: Springer.
- Penka, A. (2000). *Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen*. Dissertation, Lehrstuhl für Ergonomie der TU München.
- Pew, R. W. (2000). The state of situation awareness measurement: heading toward the next century. In M.R. Endsley & D.J. Garland (Eds.), *Situation awareness analysis and measurement* (pp. 33-47). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- Piaget, J.-P. (1952). *The origins of intelligence in children*. International University Press: New York.
- Piechulla, W. (2002). *Psychophysiologie I: Herzratenindikatoren*. Arbeit zum Pflichtwahlpraktikum „Workload – Konzepte und Messmethoden für Belastung und Beanspruchung“. Universität Regensburg.

- Preece, J., Rogers, Y., & Sharp, H. (2002). *Interaction Design: Beyond Human-computer Interaction*. New York: John Wiley & Sons.
- Preece, J., Rogers, Y., Sharp, H., Benyon, D., Holland, S., & Carey, T. (1994). *Human-computer interaction*. Wokingham, UK: Addison-Wesley.
- Preim, B. (1999). *Entwicklung interaktiver Systeme: Grundlagen, Fallbeispiele und innovative Anwendungsfelder*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Preiss, H. (2012). *Straßenzulassung für Kalifornien – Google-Roboter-Auto fährt allein*. Quelle im Internet: URL: <http://www.n-tv.de/auto/Kalifornien-erlaubt-Roboter-Autos-von-Google-article7329771.html> (Stand: 17.09.2014).
- PREVENT (2006). *RESPONSE 3 - Code of Practice for development, validation and market introduction of ADAS*. Quelle im Internet: URL: [http://preventip.org/download/deliverables/RESPONSE3/D11.2/Response3\\_CoP\\_v3.0.pdf](http://preventip.org/download/deliverables/RESPONSE3/D11.2/Response3_CoP_v3.0.pdf) (Stand: 09.07.2007)
- Pribram, K., & Mc Guinness, D. (1975). Arousal, Activation and Effort in the Control of Attention. *Psychological Review*, 82, 116-149.
- Rabe, M. (2004). *IST und Assistenzsysteme. Optimierung der individuellen Mobilität durch Assistenzsysteme*. Tagung Autovisionale, Wolfsburg. Quelle im Internet: URL: [www.wolfsburgag.com/autovisionale/downloads/rabe\\_041117.pdf](http://www.wolfsburgag.com/autovisionale/downloads/rabe_041117.pdf). (Stand: 15.02.2007).
- Radlmayr, J., Gold, C., Lorenz, L., Farid, M., & Bengler, K. (2014). How traffic situations and non-driving related tasks affect the take-over quality in highly automated driving. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*.
- Rajaonah, B., Anceaux, F., & Vienne, F. (2006). Trust and the use of adaptive cruise control: a study of a cut-in situation. *Cognition, Technology & Work*, 8, 146-155.
- Ranney, T. A. (1994). Models of driving behaviour: A review of their evolution. *Accident Analysis and Prevention*, 26(6), 733-750.
- Rasmussen, J. (1982). Human errors: A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations. *Journal of Occupational Accidents*, 4, 311-333.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules and Knowledge; Signals, Signs and Symbols and other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 13(3), 257-266.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human machine interaction: An approach to cognitive engineering*. New York: Elsevier.
- Rasmussen, J., Pejtersen, A. M., & Goodstein, L. P. (1994). *Cognitive Systems Engineering*. New York: Wiley.
- Rasmussen, J., & Rouse, W. B. (1981) (Eds.) *Human detection and diagnosis of system failures*. New York: Plenum Press.

- Rauch, N. (2009). *Ein verhaltensbasiertes Messmodell zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext*. Dissertation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- Reason, J. (1990). *Human Error*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rhede, J.G., Wäller, C., & Oel, P. (2011). Der FAS Warnbaukasten – Strategie für die systematische Entwicklung und Ausgabe von HMI-Warnungen. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit*. VDI-Berichte, 2134 (63-75). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Reichart, G., & Haller, R. (1995). Mehr aktive Sicherheit durch neue Systeme für Fahrzeug und Straßenverkehr. In W. Fastenmeier (Hrsg.), *Autofahrer und Verkehrssituation: neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme* (Vol. 33). Köln/Bonn: Verlag TÜV Rheinland/Deutscher Psychologen-Verlag.
- Renge, K. (1997). Risikowahrnehmung des Kraftfahrers in Japan. In: B. Schlag (Hrsg.), *Fortschritte der Verkehrspsychologie* (S. 583-592). Bonn: Deutscher Psychologen Verlag.
- Ribback, S. (2003). *Psychophysiologische Untersuchung mentaler Beanspruchung in simulierten Mensch-Maschine-Interaktionen*. Dissertation, Universität Potsdam.
- Richards, M. A., & Underwood, K. M. (1984). Talking to machines. How are people naturally inclined to speak? In E. D. Megaw (Ed.), *Contemporary Ergonomics* (pp. 62-67). London: Taylor & Francis.
- Richter, P., & Hacker, W. (1998). *Belastung und Beanspruchung. Stress und Monotonie in der Arbeitstätigkeit*. Heidelberg: Asanger.
- Richter, P., Wagner, T., Heger, R., & Weise, G. (1998). Psychophysiological analysis of mental load during driving on rural roads: A quasi-experimental field study. *Ergonomics (Special Issues: Psychophysiology in Ergonomics)*, 41(5), 593-609.
- Riley, V. (1994). A Theory of operator reliance on automation. In M. Mouloua & R. Parasuraman (Eds.), *Human performance in automated systems: Current research and trends* (pp. 8-14). Hillsdale, NJ: LEA.
- Risser, R., & Lehner, U. (1997). Evaluation of an ACC (Autonomous Cruise Control) System With the Help of behaviour Observation. *Intelligent Transport Systems*, Berlin.
- Rittermeier, J. (2014). VDI Themenradar Automobil: Fahrerassistenzsysteme. VDI Wissensforum - Pressemitteilung, 18.06.2014. Quelle im Internet: URL: <https://www.vdi-wissensforum.de/de/nc/presse/details/article/vdi-themenradar-automobil-fahrerassistenzsysteme/> (Stand: 01.02.2015).
- Rockwell, T. H. (1988). Spare Visual Capacity in Driving – Revisited: New Empirical Results for an Old Idea. In A. G. Gale, M. H. Freeman, C. M. Haslegrave, P. Smith & S. P. Taylor (Eds.), *Vision in Vehicles II* (pp. 317-324), Amsterdam: North Holland Press.

- Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungskonzept. In *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 38 (4), S. 193-200.
- Roscoe, A. H. (1992). Assessing pilot workload. Why measures heart rate, HRV and respiration? *Biological Psychology*, 34, 259-287.
- Rotter, J. B. (1966). Generalized expectancies for internal versus control of reinforcement. *Psychological Monographs: General and applied*, 80(1), 1-28.
- Rouse, W. B. (1976). Adaptive allocation of decision making responsibility between supervisor and computer. In T. B. Sheridan & G. Johanssen (Eds.), *Monitoring behavior and supervisory control* (pp. 295–306). New York: Plenum.
- Rudin-Brown, C. M., & Parker, H. A. (2004). Behavioural adaptation to Adaptive Cruise Control (ACC): implications for preventive strategies. *Transportation Research Part, 2*(7), 59-76.
- Rührmann, H., & Bubb, H. (2006). Fahrerassistenzsysteme. Ein Gewinn an Sicherheit und Komfort oder elektronischer Schnickschnack? *Ergonomie aktuell*, 7, 2-13. Lehrstuhl für Ergonomie.
- Rumar, K. (1985). The role of perceptual and cognitive filters in observed behaviour. In L. Evans & R. C. Sching (Eds.), *Human Behaviour and Traffic Safety* (pp. 151-170). New York: Plenum Press.
- Rushby, J. (1999). Using model checking to help discover mode confusions and other automation surprises. In D. Javaux (Ed.), *Proceedings of the 3rd Workshop on Human Error, Safety, and System Development*. University of Liege, Belgium.
- Rushby, J. (2001). Modeling the human in human factors. *Computer Safety, Reliability and Security* (pp. 86-91). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Saad, F. (2004). Behavioural adaptations to new driver support systems: some critical issues. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1, 288-293.
- SAE (2014). Taxonomy & Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems (SAE J J3016).
- Salber, D., & Coutaz, J. (1993). Applying the Wizard of Oz Technique to the Study of Multi-modal Systems. In *Human-Computer Interaction* (pp. 219-230). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Salmen, A., Großmann, P., Hitzemberger, L., & Creutzburg, U. (1999). Dialog Systems in Traffic Environment. *Proceedings of ESCA: Tutorial and Research Workshop on Interactive Dialogue in Multi-Modal Systems*.
- Sanders, A. F., Parasuraman, R., & Mouloua, M. (1983). Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychologica*, 53, 61-97.
- Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1991). Situations awareness: A critical but ill-defined phenomenon. *The International Journal of Aviation Psychology*, 1(1), 45-57.

- Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1992). Pilot interaction with cockpit automation: Operational experiences with the Flight Management System. *International Journal of Aviation Psychology*, 2, 303-322.
- Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1994). Pilot interaction with cockpit automation II: An experimental study of pilot's mental model and awareness of the flight management and guidance system. *International Journal of Aviation Psychology*, 4(1), 1-28.
- Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1995). "How in the world did we ever get into that mode?" Mode Error and Awareness in Supervisory Control. *Human Factors*, 37, 5-19.
- Sarter, N. B., Woods, D. D., & Billings, C. E. (1997). Automation Surprises. *Handbook of human factors and ergonomics*, 2, 1926-1943.
- Sasse, M. A. (1997). *Eliciting and describing users' models of computer systems*. PhD Thesis University of Birmingham.
- Scerbo, M.W., (1996). Theoretical perspectives on adaptive automation. In R. Parasuraman & M. Mouloua (Eds.), *Automation and human performance: Theory and applications* (pp. 37-63). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Scerbo, M. W. (2001). Adaptive automation. In W. Karwowski (Ed.), *International encyclopedia of ergonomics and human factors* (pp. 1077-1079). London: Taylor & Francis.
- Scerbo, M. W., Freeman, F. G., Mikulka, P. J., Parasuraman, R., Di Nocera, F., & Prinzel III, L. J. (2001). The efficacy of psychophysiological measures for implementing adaptive technology. *NASA Technical Report TP-2001-211018*- Hampton, Virginia: NASA Langley Research Center. Quelle im Internet: URL: <http://w3.uniroma1.it/dinocera/stuff/papers/NASA-2001-tp211018.pdf> (Stand: 14.08.2012).
- Schaller, T., Schielen, J., & Gradenegger, B. (2008). Stauassistentz - Unterstützung des Fahrers in der Quer- und Längsführung: Systementwicklung und Kundenakzeptanz. 3. *Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistentz*. Garching b. München.
- Schandry, R. (1998). *Lehrbuch Psychophysiologie. Körperliche Indikatoren psychischen Geschehens* (3. Auflage, Studienausgabe). Weinheim: Psychologie-Verlag.
- Schank, R. C., & Abelson, R. P. (1977). *Scripts, goals, plans and understanding*. Hillsdale: Erlbaum.
- Schanz, A. (2005). Fahrerassistentz zum automatischen Einparken. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistentzsysteme. VDI-Fortschritt-Berichte*, 12, 607. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Schaumburg, H. (2002). *Kognitions- und Lernpsychologie und HCI-Forschung*. Quelle im Internet: URL: <http://www.cmr.fu-berlin.de/~heike/courses/hci/S4-2002.pdf> (Stand: 02.04.2008).

- Schieben, A., & Flemisch, F. (2008). Who is in control? Exploration of transitions of control between driver and an eLane vehicle automation. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. VDI-Berichte, 2048* (455-469). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Schieben, A., Flemisch, F., Temme, G., Heesen, M., & Griesche, S. (2010). Usability assessment of the preliminary design for the HAVEit Joint System. In F. Flemisch & A. Schieben (Eds.), *Deliverable D33.3 – Validation of preliminary design by simulation* (pp. 43-72). HAVEit Consortium.
- Schierge, F. (2005). Welche Fahrerassistenz wünschen sich Fahrer? Methoden und Ergebnisse zur Nutzerakzeptanz von FAS aus der Forschungsinitiative INVENT. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert. VDI-Berichte, 1919* (207-219). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Schlag, B. (1986). *In meinem Alter fährt man an sich recht zügig. Untersuchungen zum Risikoverhalten und Risikobereitschaft junger Fahrer*. Unveröffentlichte Habilitationsschrift der Universität-Gesamthochschule Essen, Fachbereich Erziehungswissenschaft – Psychologie - Sport.
- Schlag, B. (1993). Elderly drivers in Germany – Fitness and Driving Behavior. *Accident Analysis and Prevention*, 25(1), 47-55.
- Schlag, B. (1994a). Geschwindigkeitswahl und Verkehrsstärke auf Bundesautobahnen. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 40, 27-29.
- Schlag, B. (1994b). Risikoverhalten im Straßenverkehr. In A. Flade (Hrsg.), *Mobilitätsverhalten: Bedingungen und Veränderungsmöglichkeiten aus umweltpsychologischer Sicht* (S. 131-138). Weinheim: Beltz PVU.
- Schlag, B. (2008). *Gefahrenkognition*. Unveröffentlichtes Vorlesungsskript, Verkehrspsychologie. Technische Universität Dresden.
- Schlag, B., & Heger, R. (2002). *Empfehlungen zur Berücksichtigung physiologischer und psychologischer Fähigkeiten und Grenzen der Kraftfahrer bei der Straßenplanung in Brandenburg. 1. Stufe: Systematisierung und Evaluation vorhandener Erkenntnisse*. Unveröffentlichter Bericht. Dresden: Technische Universität.
- Schlag, B., Petermann, I., Weller, G., & Schulze, Ch. (Hrsg.), (2008). *Mehr Licht – mehr Sicht - mehr Sicherheit? Zur Wirkung verbesserter Licht- und Sichtbedingungen auf das Fahrverhalten*. Wiesbaden: VS Research.
- Schlag, B., & Schade, J. (2007). Psychologie des Mobilitätsverhaltens. *Aus Politik und Zeitgeschichte*, 7(29-30), 27-32.
- Schmidt, R.A. (1993). Unintended acceleration: Human performance considerations. In B. Peacock & W. Karwowski (Eds.), *Automotive Ergonomics* (pp. 431-451). London: Taylor & Francis.



- Schmidt, G., Kiss, M., Babbel, E. & Galla, A. (2008). The Wizard on Wheels: Rapid Prototyping and User Testing of Future Driver Assistance Using Wizard of Oz Technique in a Vehicle. *Proceedings of the FISITA 2008 – The Future of Automobiles and Mobility*, München.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (1999). *Motor control and learning: a behavioural emphasis* (3rd ed.). Champaign: Human Kinetics.
- Schneider, M. (2008). Automation im Automobil – Auf dem Weg zur nutzerzentrierten Fahrerassistenz. VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. VDI-Berichte, 2048* (315-329). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Schierge, F. (2005). Welche Fahrerassistenz wünschen sich die Fahrer? Methoden und Ergebnisse zur Nutzerakzeptanz von FAS aus der Forschungsinitiative INVENT. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert. VDI-Berichte, 1919* (207-220). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Shiff, B. (1983). *An experimental study of the human-computer interface in process control*. Unpublished thesis. Toronto: University of Toronto.
- Schömig, N., & Kaussner, A. (2010). Driver's reactions to take-over requests when driving Highly Automated. In F. Flemisch & A. Schieben (Eds.), *Deliverable D33.3 – Validation of preliminary design by simulation* (pp. 72-81). HAVEit Consortium.
- Schömig, N., Hargutt, V., Neukum, A., Othersen, I. & Petermann-Stock, I. (2015). The interaction between highly automated driving and the development of drowsiness. *6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. In press.
- Scholl, P. (2009). *Autobahnatlas – Webseite über das deutsche Autobahnnetz*. Quelle im Internet: URL: <http://www.autobahnatlas-online.de/> (Stand: 27.08.2009).
- Scholl, W. (2007). Aktiv – gemeinsam die Zukunft erfahren. Quelle im Internet: URL: [http://www.vwi.tu-dresden.de/~treiber/download\\_general/aktiv\\_image\\_deutsch.pdf](http://www.vwi.tu-dresden.de/~treiber/download_general/aktiv_image_deutsch.pdf) (Stand: 01.02.2015).
- Scholliers, J., Kutzner, R., Luoma, J., Sihvola, N., Leanderson, S., Netto, M., Blosseville, J.-M., Van Noort, M., Tango, F., Koskinen, S., Joshi, S., Noecker, G., Aust, M. L., Chen, J., & Gemou, M. (2008). IP\_D12/D16.4 Project Final report and recommendations for future assessments. PReVAL/ PReVENT.
- Schomerus, J., Flemisch, F. O., Kelsch, J., Schieben, A., & Schmunzsch, U. (2006). Erwartungsbasierte Gestaltung mit Theatersystem- / Wizard-of-Oz-Technik am Beispiel eines haptischen Assistenzsystems. *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme, und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)* (S. 209-225). Braunschweig: GZVB.

- Schroeder, D. J., & Nye, L. G. (1993). An examination of the workload conditions associated with operational errors/deviations at air route traffic control centers. In M. D. Rodgers (Ed.), *An examination of the operational error database for Air Route Traffic Control Centers* (Report No. DOT/FAA/AM-93/22). Washington DC: Federal Aviation Administration.
- Schulze, M., Mäkinen, T., Irion, J., Flament, M., & Kessel, T. (2008). *PReVENT – Preventive and Active Safety Applications Integrated Project*. PRevent Final Report (IP\_D15).
- Sellen, A. J., Kurtenbach, G. P., & Buxton, W. A. (1992). The prevention of mode errors through sensory feedback. *Human Computer Interaction*, 7, 141-164.
- Sellen, A. J., Kurtenbach, G. P., & Buxton, W. A. (1993). An empirical evaluation of some articulatory and cognitive aspects of marking menus. *Human Computer Interaction*, 8(1), 1-23.
- Sheridan, T. B. (1988). Task allocation and supervisory control. In M. Helander (Ed.), *Handbook of Human-Computer Interaction* (pp. 159-173) Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Sheridan, T. B. (2000). Function allocation: Algorithm, alchemy, or apostasy? *International Journal of Human-Computer Studies*, 52, 203-216.
- Sheridan, T. B., & Parasuraman, R. (2006). Human-Automation Interaction. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 1, 89-129.
- Sheridan, T. B., & Verplank, W. L. (1978). *Human and computer control of undersea teleoperators (Man-Machine Systems Lab Report)*. Cambridge: MIT.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological Review*, 84, 127-190.
- Shladover, S. E. (1995). Review of the State of Development of Advanced Vehicle Control Systems (AVCS). *Vehicle System Dynamics*, 24(6-7), 551-595.
- Skottke, E.-M. (2007). *Automatisierter Kolonnenverkehr und adaptiertes Fahrverhalten. Untersuchungen des Abstandsverhaltens zur Bewertung möglicher künftiger Verkehrsszenarien*. Dissertation. Hamburg: Verlag Dr. Kovac.
- Siedersberger, K.-H. (2003). *Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München.
- Simon, J. H. (2005). *Learning to drive with Advanced Driver Assistance Systems. Empirical studies of an online tutor and a personalised warning display on the effects of learnability and the acquisition of skill*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.
- Simons, D. J. (2000). Current approaches to change blindness. *Visual Cognition*, 7, 1-15.

- Smith, S. L., & Gerhart, S. L. (1988). Statemate and cruise control: A case study. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Computer Software and Applications Conference* (pp. 49-56). New York: IEEE Press.
- Smith, K., & Hancock, P. A. (1995). Situation awareness is adaptive, externally directed consciousness. *Human Factors*, 37(1), 137-148.
- Sokolov, E. N. (1960). Neuronal models in the orienting reflex. In M. A. Brazier (Ed.), *The central nervous system and behaviour*. New York: Macy Foundation.
- Sokolow, A. (2013). *Google setzt die Autoindustrie unter Druck*. Quelle im Internet: URL: <http://www.welt.de/wirtschaft/article123276824/Google-setzt-die-Autoindustrie-unter-Druck.html> (Stand: 17.09.2014).
- Stanton, N. A., & Marsden, P. (1996). From fly-by-wire to drive-by-wire: safety implications of vehicle automation. *Safety Science*, 24(1), 35-49.
- Stanton, N. A., & Young, M. S. (1998). Vehicle automation and driving performance. *Ergonomics*, 41, 1014–1028.
- Stanton, N. A., & Young, M. S. (2000). A proposed psychological model of driving automation. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 1(4), 315-331.
- StatBA (2009). *Unfallentwicklung auf deutschen Strassen 2008*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Staubach, M. (2009): *Identifikation menschlicher Einflüsse auf Verkehrsunfälle als Grundlage zur Beurteilung von Fahrerassistenzsystem-Potentialen*. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- Stern, J., & Schlag, B. (2001). Akzeptanz von Verkehrssicherheitsmaßnahmen durch 18-24jährige Autofahrer. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 47(1), 23-29.
- Stiller, C. (2005). Fahrerassistenzsysteme – von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr. In M. Maurer und C. Stiller (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung* (S. 1-20). Berlin: Springer.
- Straube, E., Schlenker, R., Klessinger, T. Himer, W., & Boven, K. (1987). Electrodermal orienting response and selective attention. *Psychophysiology*, 24, 615.
- Streitz, N. (1990). Psychologische Aspekte der Mensch-Computer-Interaktion. In Hoyos, C.G. & B. Zimolong (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie, Ingenieurpsychologie* (1. Auflage), S. 240–284. Göttingen: Hogrefe.
- Stumpf, H. (2000). Training und Übung. In M. Amelang (Hrsg.), *Determinanten individueller Unterschiede. Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich C Theorie und Forschung, Serie VIII Differentielle Psychologie und Persönlichkeitsforschung, Band 4* (S. 487-538). Göttingen: Hogrefe-Verlag.

- Stockburger, C. (2013). *Automatisiertes Fahren: Mensch gegen Maschine*. Quelle im Internet: URL: [www.spiegel.de/auto/fahrkultur/rechtliche-und-ethische-fragen-zum-automatisierten-fahren-a-905181.html](http://www.spiegel.de/auto/fahrkultur/rechtliche-und-ethische-fragen-zum-automatisierten-fahren-a-905181.html) (Stand: 04.11.2014).
- Stottke, E. M. (2007). *Automatisierter Kolonnenverkehr und adaptiertes Fahrverhalten. Untersuchungen des Abstandsverhaltens zur Bewertung möglicher künftiger Verkehrsszenarien*. Schriften zur Arbeits-, Betriebs- und Organisationspsychologie (Bd. 34). Hamburg: Verlag Dr. Kovac.
- Svensson, E. A., & Wilson, G. F. (2002). Psychological and psychophysiological models of pilot performance for systems development and mission evaluation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 12(1), 95-110.
- Taylor, R. M., & Selcon, S. J. (1994). Situation in mind: Theory, application and measurement of situational awareness. In R. D. Gilson, D. J. Garland & J. M. Koonce (Eds.), *Situational awareness in complex settings* (pp. 69-78). Daytona Beach, FL: Embry-Riddle Aeronautical University Press.
- Tenney, Y. T., Adams, M. J., Pew, R. W., Huggins, A. W. F., & Rogers, W. H. (1992). *A principle approach to the measurement of situation awareness in commercial aviation* (NASA Contractor Report 4451). Langely, VA: NASA Langely Research Center.
- Theofanou, D. (2002). *Maße zur Erfassung von visueller Ablenkung bei verschiedenen komplexen Streckenabschnitten*. Dissertation, Universität Regensburg.
- Thiel, S. (2000). *Mentale Beanspruchungsmessung im Labor und Feld: Eine verkehrspsychologische Studie*. Aachen: Shaker.
- Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., Stavens, D., Aron, A., Diebel, J., Fong, P., Gale, J., Halpenny, M., Hoffmann, G., Lau, K., Oakley, C., Palatucci, M., Pratt, V., Stang, P., Strohband, S., Dupont, C., Jendrossek, L.-E., Koelen, C., Markey, C., Rummel, C., van Niekirk, J., Jensen, E., Alessandrini, P., Bradski, G., Davies, B., Ettinger, S., Kaehler, A., Nefian, A., & Mahoney, P. (2006). Winning the darpa grand challenge. *Journal of field Robotics*. Accepted for publication.
- Tijerina, L. (2000). *Issues in the Evaluation of Driver Distraction Associated with In-Vehicle Information and Telecommunications Systems*. Quelle im Internet: URL: <http://www.nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-13/driver-distraction/PDF/3.pdf> (Stand: 01.05.2002).
- Timpe, K.-P. (1990). Informationsdarstellungen in Mensch-Maschine-Systemen. In Hoyos, C. & Zimolong, B. (Hrsg.), *Ingenieurpsychologie* (S. 178-203). Göttingen: Hogrefe.
- Timpe, K.-P., & Kolrep, H. (2002). Das Mensch-Maschine-System als interdisziplinärer Gegenstand. In K.-P. Timpe, T. Jürgensohn & H. Kolrep (Hrsg.), *Mensch-Maschine-Systemtechnik - Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation*, S. 9-40. Düsseldorf: Symposion.

- Treat, J. R. (1977). Tri-level study of the causes of traffic accidents: An overview of final results. *Proceedings: American Association for Automotive Medicine Annual Conference* (Vol. 21, pp. 391-403). Association for the Advancement of Automotive Medicine.
- Tsao, H. S. J., Hall, R. W., & Shladover, S. E. (1993). Design options for operating automated highway systems. *Proceedings of the IEEE Vehicle Navigation and Information Systems Conference* (pp. 494-500). IEEE.
- Toaka, G. T. (1990). Duration of Drivers' Glances at Mirrors and Displays. *ITE Journal*, 60, 35-39.
- Toffetti, A., Wilschut, E., Martens, M. H., Schieben, A., Rambaldini, A., Merat, N., & Flemisch, F. (2009). *CityMobil: Human factors issues regarding highly-automated vehicles on an eLane*. Transportation Research Record 2110.
- Totzke, I., Hofmann, M., Meilinger, T., Rauch, N., Schmidt, G., & Krüger, H.-P. (2004). Kompetenzerwerb für Informationssysteme - Einfluss des Lernprozesses auf die Interaktion mit Fahrerinformationssystemen. *FAT-Schriftenreihe Band 184*. Offenbach: Berthold Druck.
- Totzke, I. & Krüger, H.-P. (2003). *Zur Gestaltung von Fahrerinformationssystemen unter Gesichtspunkt der Erlernbarkeit*. FAT/BASSt-Symposium Informations- und Assistenzsysteme im Auto: Erlernbarkeit als Beitrag zur Fahrsicherheit, Bergisch Gladbach, 02.07.03.
- Ulich, E. (2005). *Arbeitspsychologie*. 6. Aufl. Zürich: Schäffer-Poeschel.
- Vakil, S. S. & Hansman Jr., R. J. (2002). Approaches to mitigating complexity-driven issues in commercial autoflight systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 75, 133-145.
- Vanholme, B., Gruyer, D., Glase, S., & Mammar, S. (2011). A Legal Safety Concept for Highly Automated Driving on Highways. *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, pp. 536-570.
- Vicente, K. J. (1999). *Cognitive Work Analysis*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates
- Verwey, W. B., & Veltman, H. A. (1996). Detecting short periods of elevated workload: A comparison of nine workload assessment techniques. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2(3), 270-285.
- Vukotich, A. & Popken, M. (2005). An Analysis of Driver Assistance. Quelle im Internet: URL: <http://www.fourtitude.com/cgi-bin/artman/exec/view.cgi/6/1422/printer> (Stand: 20.02.2015).
- VW (2007). *Selbststudienprogramm 389 – Der Parklenkassistent*. Volkswagen AG Service Training, Wolfsburg.

- Vollrath, M. (2007). Mobil im Alter und die Sicherheit? In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Der Fahrer im 21. Jahrhundert Human Machine Interface. VDI-Berichte, 2015* (139-150). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Vollrath, M., Briest, S., & Oeltze, K. (2010). *Auswirkungen des Fahrens mit Tempomat und ACC auf das Fahrverhalten*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft F 74. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft.
- Vollrath, M., Briest, S., Schießl, C., Drews, J., & Becker, U. (2006). *Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit*. BAST-Bericht F 60. Bremerhaven: NW Verlag.
- Vollrath, M., & Flemisch, F. (2006). Interaktionsgestaltung für hoch automatisierte Fahrzeuge. In GZVB (Hrsg.), *IMA Informationssysteme für mobile Anwendungen* (S. 57-75). Braunschweig: GZVB.
- Vossel, G. (1990). *Elektrodermale Labilität. Ein Beitrag zur Differentiellen Psychophysiologie*. Göttingen: Hogrefe.
- Vrolix, K. (2006). *Behavioural Adaptation, Risk Compensation, Risk Homeostasis and Moral Hazard in Traffic Safety. Literature Review* (Rapportnummer RA-2006-95). Diepenbeek: Steunpunt Verkeersveiligheid.
- Waller, C., Petermann, I., Kleen, A., & Peukert, M. (2010). Konzeption und Bewertung von HMI-Metaphern für Fahrerassistenzsysteme. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. VDI-Berichte, 2104* (261-277). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH
- Wagenaar, W. A., & Keren, G. B. (1986). Does the expert know? The reliability of predictions and confidence ratings of experts. In E. Hollnagel, G. Mancini & D. D. Woods (Eds.), *Intelligent decision support in process environments* (pp. 87-103). New York: Springer-Verlag.
- Wakasugi, T. (2005). A study on warning timing for lane change decision and systems based on driver's lane change maneuver. *Proceedings 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Paper* (No. 05-0290).
- Walschburger, P. (1991). Konzentration und psychophysiologische Regulation unter Belastung: Situations-, Verlaufs-, und Personenmerkmale. In J. P. Janssen, E. Hahn & H. Strang (Hrsg.), *Konzentration und Leistung* (S. 89-96). Göttingen: Hogrefe.
- Wandke, H. (2004). *Einführung in die Ingenieurpsychologie*. (Unveröffentlichtes Vorlesungsskript). HU Berlin.
- Wandke, H. (2005). Assistance in human-machine interaction: a conceptual framework and a proposal for a taxonomy. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 6, 129-155.

- Wandke, H., Wetzstein, E., & Polkehn, K. (2005). Handlungsbezogene Elementarbausteine für Fahrerassistenzsysteme. In VDI (Hrsg.), *Fahrer im 21. Jahrhundert - Der Mensch als Fahrer und seine Interaktion als Fahrer*. VDI-Berichte Nr. 1919. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Walker, G. H., Stanton, N. A., & Young, M. S. (2001). Where is computing driving cars? *International Journal of Human Computer Interaction*, 13 (2), 203-229.
- Wallentowitz, H., Ehmanns, D., Neunzig, D., & Weilkes, M. (2001). *Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (35).
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven A., & Olschewski, I. (2009). *Strategien in der Automobilindustrie. Technologietrends und Marktentwicklungen*. ATZ-MTZ Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Wallston, K. A. (2001). Conceptualization and operationalization of perceived control. In A. Baum, T. Revenson, & J. Singer (Eds.), *The Handbook of Health Psychology*. Mahwah: New York: Erlbaum.
- Ward, N. (2000). Automation of Task Processes: An example of intelligent transportation systems. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 10 (4), 395-408.
- Warm, J. S., Dember, W. N., & Hancock, P. A. (1996). Vigilance and Workload in Automated Systems. In R. Parasuraman & M. Mouloua (Hrsg.), *Automation and Human Performance: Theory and Application* (S. 183-199). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Warm, J.S., Parasuraman, R. & Matthews, G. (2008). Vigilance requires hard mental work and is stressful. *Human Factors*, 50(3), 433-441.
- Watanabe, T., Kishimoto, N., Hayafune, K., Yamada, K., & Maede, N. (1995). Development of an Intelligent Cruise Control System. *Proceedings 2nd ITS World Congress* (S. 1229-1235). Yokohama.
- Watson, J. B. (1924). *Behaviorism*. New York: Norton.
- Weinberger, M. (2001). *Der Einfluss von Adaptive Cruise Control Systemen auf das Fahrerverhalten*. Aachen: Shaker Verlag.
- Weiser, A., Bartels, Dr., A., Steinmeyer, S., Weiß, Dr., K., & Marek, Dr. M. (2009). Intelligent Car, Teilautomatisches Fahren auf der Autobahn. In GZVB (Hrsg.), *AAET 2009 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel* (S. 11-26). Braunschweig: GZVB.
- Weiß, J. (2002). *S.A.N.T.O.S (Situationsangepasste und Nutzer-Typ-Zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung)*. Abschlussbericht. Institut für Arbeitswissenschaft. Technische Universität Darmstadt.

- Weller, G., & Schlag, B. (2004). Verhaltensadaptation nach der Einführung von Fahrerassistenzsystemen: Vorstellung eines Modells und Ergebnisse einer Expertenbefragung. In B. Schlag (Hrsg.), *Verkehrspsychologie. Mobilität - Sicherheit – Fahrerassistenz* (S. 351-370). Lengerich: Pabst Science Publishers.
- Wieland, M. (2013). *Variation der Systeminformation in der hochautomatischen Fahrt*. Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Wiener, Earl L. (1989). Human Factors of Advanced Technology ("Glass Cockpit") Transport Aircraft. NASA Contractor Report 177528. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA.
- Wiener, E. L. (1985). Cockpit automation: In need of a philosophy. In Proceedings of the 1985 Behavioral Engineering Conference (pp. 369-375). Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.
- Wiener, E. L., & Curry, R. E. (1980). Flight Deck automation: Promises and problems. *Ergonomics*, 23, 995-1011.
- Wierwille, W. W. (1992). Ein erstes Modell zur Frage: Wie erfassen Fahrer visuelle Informationen aus fahrzeugeigenen Anzeigen? In K. W. Reinschild (Hrsg.), *Bewertung von Windschutzscheiben, Anzeige- und Blickregistrierungstechniken. Aspekte der Verkehrssicherheit* (S. 81-96). Köln: Verlag TÜV Rheinland.
- Wickens, C. D. (1984). Processing resource and attention. In R. Parasuraman & R. Davies (Eds.), *Varieties of attention* (S. 63-101). New York: Academic Press.
- Wickens, C. D. (1996). Situation awareness: impact of automation and display technology. In *Situation awareness: Limitations and Enhancement in the aviation environment* (pp. k2.1-k2.13). Brussels AGARD Conference Proceedings.
- Wickens, C. D. (2000). The tradeoff of design for routine and unexpected performance: Implications of situation awareness. In M. R. Endsley & D. J. Garland (Eds.), *Situation awareness analysis and measurement* (pp. 211-225). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Wickens, C. D., & Holland, J. G. (2000). *Engineering Psychology and Human Performance*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Wickens, C. D., Lee, J. D., Liu, Y., & Gordon Becker, S. E. (2004). *An introduction to human factors engineering*. Upper Saddle River, NJ : Pearson.
- Wickens, C. D., McCarley, J. S. , Alexander, A. L., Thomas, L. C., Ambinder, M., & Zheng, S. (2005). Attention-Situation Awareness (A-SA) Model of Pilot Error (Technical Report: AHFD-04-15/NASA-04-5). Moffett Field, CA: NASA Ames Research Center.
- Wilde, G. J. S. (1982). The theory of risk homeostasis: Implications for safety and health. *Risk Analysis*, 2(4), 209-225.



- Wilder, J. (1931). Das „Ausgangswert-Gesetz“, ein unbeachtetes biologisches Gesetz und seine Bedeutung für Forschung und Praxis. *Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie*, 137, 317-338.
- Williams, M. D., Hollan, J. D., & Stevens, A. L. (1983). Human reasoning about a simple physical system. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), *Mental Models* (pp. 131-153). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Willmes-Lenz, G. (2003). Internationale Erfahrungen mit neuen Ansätzen zur Absenkung des Unfallrisikos junger Fahrer und Fahranfänger. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Heft M 144.
- Wimmer, M. (2014). Entwicklung und Erprobung von Mensch-Maschine-Systemen zur automatisierten Fahrzeugführung. *Audi Dissertationsreihe*, Band 95. Göttingen: Cuvillier Verlag
- Winkler, S., Kazazi, J., & Vollrath, M. (2014). Nutzerzentrierte, situationsgerechte Warnkonzepte - Wie warnt man in der Stadt am besten? 56. *Tagung Experimentell Arbeitender Psychologen (TeaP 2014)*. Gießen.
- Winner, H., Danner, B., & Steinle, J. (2009). Adaptive Cruise Control. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 478-521). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Winner, H., & Wolf, G. (2009a). Kooperative Automation. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 664-673). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Winner, H., & Wolf, G. (2009b). Quo vadis, FAS? In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 664-673). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Wirtz, M. & Nachtigall, C. (2006). *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Inferenzstatistik: Statistische Methoden für Psychologen* (Bd. 2). Weinheim: Juventa.
- Wörsdörfer, K.-F., & Maurer, M. (2003). Fahrerassistenzsysteme zur Erhöhung der Sicherheit. 5. *Internationales Stuttgarter Symposium* (S. 653-663). Expert-Verlag.
- Wolf, H. (2006). Fahrerassistenzsysteme. Ein Überblick über den jetzigen und zukünftigen zu erwarteten Stand. *Ergonomie aktuell*, 7, 15-20. Lehrstuhl für Ergonomie.
- Wolf, H., Zöllner, R., & Bubb, H. (2005). Ergonomische Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion bei gleichzeitig agierenden Fahrerassistenzsystemen. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 3(51), 119-127.
- Woods, D. D. (1993). Cognitive demands and activities in dynamic fault management: abduktive reasing and disturbance management. In N. Stanton (Ed.), *Human Factors in Alarm-Design*. London: Taylor & Francis.

- Woods, D. D., Johannesen, L., Cook, R. I., & Sarter, N. B. (1994). *Behind Human Error: Cognitive Systems, Computers, and Hindsight* (State-of-the-Art Report). Dayton, OH: Crew Systems Ergonomic Information and Analysis Center.
- Woods, D. D., O'Brien, J. F., & Hanes, L. F. (1987). Human factors challenges in process control: the case of nuclear power plants. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of Human Factors*, 1724-1770. New York: Wiley.
- Wünsche, H.-J. (2013). Geschichte des automatischen Fahrens. *Vortrag auf der 6. Tagung Fahrerassistenz*, TÜV-Süd, München, 28.-29.11.2013.
- Wyman, O. (2003). *Fahrzeugsicherheit. Interviews*. ATZ. Quelle im Internet: URL: [www.oliverwyman.de/deu-insights/Charts\\_Fahrzeugsicherheit.pdf](http://www.oliverwyman.de/deu-insights/Charts_Fahrzeugsicherheit.pdf) (Stand: 26.10.2014).
- Zapp, A. (1988). *Automatische Straßenfahrzeugführung durch Rechnersehen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik.
- Zeier, H. (1979). Concurrent physiological activity of driver and passenger when driving with and without automatic transmission in heavy city traffic. *Ergonomics*, 22(7), 799-810.
- Zijlstra, F. R. H., & van Doorn, L. (1985). *The construction of a scale to measure perceived effort*. Delft: Department of Philosophy and Social Sciences, Delft University of Technology.
- Zimmer, A. (2009). Wie intelligent darf/muss ein Auto sein? Anmerkungen aus Ingenieurspsychologischer Sicht. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 39-55). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Zittlau, D. (2006). Fahrerassistenzsysteme: Steigerung von Komfort und Sicherheit. In GZVB (Hrsg.), *AAET 2006 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig: GZVB.
- Zwahlen, H. T., Adams, C. C. & DeBald, D. P. (1988). Safety aspects of CRT touch panel controls in automobiles. *Stress and Tension Control* 3. Stress Management, 335- 344.
- Zwerschke, S. (2006). Untersuchung zu Bekanntheit, Akzeptanz und Kaufinteresse von Fahrerassistenzsystemen. In VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. VDI-Berichte, 1960* (343-358). Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Taxonomie von Automatisierungsstufen nach Sheridan und Verplank (1978, zitiert nach Hauß & Timpe, 2002).....	38
Tabelle 2:	Automatisierungsstufen nach Endsley und Kaber (1999).....	39
Tabelle 3:	Übergreifende Forschungsfragen .....	68
Tabelle 4:	Kurzbeschreibung und Namens Kürzel der integrierten Systemmodi.....	75
Tabelle 5:	Bedeutung der Pfeile des Zustandsdiagramms in Abbildung 24 .....	78
Tabelle 6:	Globale Klassifikation von Transitionen (Martens et al., 2007; modifiziert) .....	79
Tabelle 7:	Merkmalskategorien mit erhöhter Wahrscheinlichkeit für Mode Confusion oder Mode Errors, inklusive der Situation Awareness Level nach Endsley (1995a) .....	81
Tabelle 8:	Ausgewählte Merkmale von Transitionen für die vorliegende Arbeit .....	84
Tabelle 9:	Spezifische Forschungsfragen zum Grad der Kontrollverschiebung .....	88
Tabelle 10:	Spezifische Forschungsfragen zur indirekten Transition .....	89
Tabelle 11:	Spezifische Forschungsfragen zur Ähnlichkeit von Systemmodi .....	90
Tabelle 12:	Spezifische Forschungsfragen zur Richtung der Transition .....	91
Tabelle 13:	Hypothesen der ersten Studie für Transitionen in Richtung Automation .....	96
Tabelle 14:	Hypothesen der ersten Studie für Transitionen in Richtung Fahrer .....	97
Tabelle 15:	Hypothesen zur Wechselwirkung der betrachteten Transitionsmerkmale .....	97
Tabelle 16:	Beschreibung der Transitionen in Richtung Automation aus Abbildung 35 ....	100
Tabelle 17:	Beschreibung der Transitionen in Richtung Fahrer aus Abbildung 35 .....	100
Tabelle 18:	Vorhandensein und Nutzungshäufigkeit ausgewählter FAS.....	115
Tabelle 19:	Relevante Kennwerte für die Analyse der Fahrdaten mittels CANoe .....	121
Tabelle 20:	Parameterberechnung aus Fahrzeugkennwerten für Reaktionszeitanalyse ..	122
Tabelle 21:	Hypothesen der zweiten Studie für Transitionen in Richtung Automation .....	149
Tabelle 22:	Hypothesen der zweiten Studie für Transitionen in Richtung Fahrer .....	150
Tabelle 23:	Beschreibung der Transitionen in Richtung Automation aus Abbildung 61 ....	152
Tabelle 24:	Beschreibung der Transitionen in Richtung Fahrer aus Abbildung 61 .....	153
Tabelle 25:	Versuchsablauf der Fahrsimulatorstudie je Proband .....	168
Tabelle 26:	Vorhandensein und Nutzungshäufigkeit ausgewählter FAS im Privatfahrzeug.....	169
Tabelle 27:	Relevante Kennwerte für die Analyse der Fahrdaten der zweiten Studie .....	174
Tabelle 28:	Parameterberechnung aus Fahrzeugkennwerten für Reaktionszeitanalyse ..	174
Tabelle 29:	Ergebnis der Varianzanalyse zur kardiovaskulären Aktivität bei Übergang....	189
Tabelle 30:	Signifikante Ergebnisse der Analyse der Hautleitfähigkeitsreaktion* .....	191
Tabelle 31:	Signifikante Ergebnisse der Varianzanalyse der Fahr- und Fragebogendaten.....	195
Tabelle 32:	Signifikante Ergebnisse der Varianzanalyse der biophysiologicalen Daten* ..	198
Tabelle 33:	Signifikante Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten (summierter Wert) ...	202
Tabelle 34:	Signifikante Ergebnisse der Varianzanalyse der Fahr- und Fragebogendaten.....	203
Tabelle 35:	Signifikante Ergebnisse der Varianzanalyse der biophysiologicalen Daten ..	206
Tabelle 36:	Signifikante Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten (summierter Wert) ...	208
Tabelle 37:	Signifikante Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten (summierter Wert) ...	225

## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Meilensteine der Fahrerassistenzsystemeinführung in Deutschland .....	8
Abbildung 2:	Übersicht über Fahrzeugmodelle mit ACC am Markt (Winner, Danner & Steinle, 2009; modifiziert) .....	11
Abbildung 3:	ACC Zustände nach ISO 15622 (DIN EN ISO 15622, 2002; modifiziert) ...	13
Abbildung 4:	Komponenten eines Spurführungssystems (links), elektromechanische Servolenkung (Mitte), CMOS Kameramodul der Firma ADC (links) (VW, 2007) .....	14
Abbildung 5:	AUDI Lane Assist (Vukotich & Popken, 2005; modifiziert) .....	14
Abbildung 6:	Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis mit den drei ineinander verschachtelten Ebenen der primären Fahraufgabe (Lange, 2008; modifiziert) .....	16
Abbildung 7:	3-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen (Rasmussen, 1983; links) und 3-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe (Donges, 1982; rechts) nach Donges (2009; modifiziert) .....	18
Abbildung 8:	Stufen des Automatisierten Fahrens (Gasser et al., 2012; modifiziert) .....	19
Abbildung 9:	Roadmap zur Einführung von ADAS in Europa (Ehmanns & Spannheimer, 2004) .....	21
Abbildung 10:	Prozentualer Anteil der häufigsten Einflussfaktoren über alle Unfalltypenkategorien für N = 343 befragte Unfallverursacher (Staubach, 2009; modifiziert) .....	25
Abbildung 11:	Potentialausschöpfung der aktiven und passiven Sicherheit (Heißing, 2006; modifiziert) .....	26
Abbildung 12:	Veränderung der Kundenansprüche (Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski, 2008; modifiziert) .....	28
Abbildung 13:	Abgrenzung Automation und Assistenz (Lienkamp & Bartels, 2009; modifiziert) .....	30
Abbildung 14:	Automatisierungsgrade zweier exemplarischer Systeme (A, B) in verschiedenen Phasen des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses (Parasuraman et al., 2000; modifiziert) .....	40
Abbildung 15:	Das Unterstützungssystem zwischen manuellem und automatisiertem Mensch-Maschine-System (Hauß & Timpe, 2002; modifiziert) .....	41
Abbildung 16:	Modell von Situationsbewusstsein nach Endsley (1995b; modifiziert) .....	44
Abbildung 17:	An Situationsbewusstsein beteiligte kognitive Prozesse (Endsley, 2000; modifiziert) .....	47
Abbildung 18:	Darstellung der Zustände und Transitionen für das Fahrerassistenz- system "Tempomat" nach Degani, Shafto & Kirlik (1996; modifiziert) .....	53
Abbildung 19:	Die Bedeutung von mentalen Modellen und Schemata (Endsley, 2000; modifiziert) .....	57
Abbildung 20:	Zwischenbeziehungen zwischen drei Basiselementen einer reibungs- losen Mensch-Maschine-Interaktion (links; Degani & Heymann, 2000; modifiziert) sowie Designmodell, Benutzermodell und Systembild (rechts; Norman, 1989; modifiziert) .....	59
Abbildung 21:	Untersuchte, vier Automationsstufen der vorliegenden Arbeit: „Fahrer selbst“, „Assistiert“, „Teilautomatisiert“ und „Hochautomatisiert“ .....	72
Abbildung 22:	Integrierte Systemmodi innerhalb des mehrstufigen Automationsan- satzes, inklusive Modusbezeichnung in der vorliegenden Arbeit .....	74
Abbildung 23:	Zuordnung der ausgewählten Systemmodi dieser Arbeit zur Taxonomie der Aufgabenverteilung nach Parasuraman et al. (2000) .....	76
Abbildung 24:	Zustandsdiagramm mit potentiell denkbaren Transitionen und Zustandsveränderungen zwischen einzelnen Stufen der Automation .....	77
Abbildung 25:	Strukturierung von Transitionen aus technischer Sicht .....	80
Abbildung 26:	Aggregation der Strukturierung von Transitionen aus technischer (vgl. Abbildung 25) und psychologischer Sicht (vgl. Tabelle 7) .....	82

Abbildung 27:	Transitionsrelevante Anwendungsfälle der vorliegenden Arbeit mit Bezug zum Fahrkontext und den ausgewählten Systemmodi.....	85
Abbildung 28:	Zustandsdiagramm für das Merkmal „Grad der Kontrollverschiebung“ .....	87
Abbildung 29:	Zustandsdiagramm für das Merkmal „Indirekte Transition“ .....	89
Abbildung 30:	Zustandsdiagramm für das Merkmal „Ähnlichkeit von Systemmodi“ .....	90
Abbildung 31:	Darstellung der zwei Transitionsrichtungen zwischen Fahrer und Automation .....	91
Abbildung 32:	Untersuchungsschwerpunkte der zwei durchgeführten Studien .....	93
Abbildung 33:	Methodische Eckdaten der zwei durchgeführten Studien .....	94
Abbildung 34:	Automationsstufen und Systemmodi der ersten Studie .....	99
Abbildung 35:	Transitionssituationen zwischen den Systemmodi der ersten Studie.....	99
Abbildung 36:	Schematische Darstellung der Wizard-of-Oz Technik in einem Fahrzeug .....	102
Abbildung 37:	Wizard-of-Oz Versuchsfahrzeug der Volkswagen AG.....	103
Abbildung 38:	Bedienelements des Schwarzfahrers (Wizard) .....	104
Abbildung 39:	Bedienelements des Schwarzfahrers (links) und des Fahrers vorn (rechts) .....	105
Abbildung 40:	Wizardseitig nachgebildete Regelungsalgorithmen für die Spurhaltungsvarianten der Modi „Assistent“ (links) und „Pilot“ (rechts).....	108
Abbildung 41:	Systemzustandsanzeigen der ersten Studie .....	109
Abbildung 42:	Transitionsrelevante Streckenpunkte der ersten Studie in Fahrtverlauf von Eching bis Lenting (A9).....	111
Abbildung 43:	Versuchsplan der ersten Studie, getrennt für die Richtung der Transition .....	112
Abbildung 44:	Abfolge der Transitionen über den Fahrtverlauf (vgl. Abbildung 42).....	113
Abbildung 45:	Verteilung des KUT-Gesamtwertes innerhalb der Stichprobe der ersten Studie (links), inklusive 25 %, 50 %, 75 % Perzentil (rechts) .....	116
Abbildung 46:	Platzierung der Messtechnik im Versuchsfahrzeug.....	118
Abbildung 47:	Zusammenhang zwischen Blickdauer, Blickhäufigkeit und Kritikalität im Straßenverkehr (Zwahlen, Adams und DeBald, 1988; modifiziert).....	120
Abbildung 48:	Beispielitem mit verwendeter Kategorienunterteilungsskala (Heller, 1985).....	124
Abbildung 49:	Überblick über die ausgewerteten Daten der ersten Studie .....	124
Abbildung 50:	Transitionen des ersten Ergebnisblocks in Richtung Automation .....	126
Abbildung 51:	Transitionen des zweiten Ergebnisblocks in Richtung Fahrer .....	126
Abbildung 52:	Aktivierungsdauer ( $M$ , $SD$ ) für Transitionen auf „Assistent“ und „Pilot“ für den „Grad der Kontrollverschiebung“ und die „Art der Transition“ .....	128
Abbildung 53:	Mittlere Blickdauer [s] in Relation zur Nummer der Blicke für die Aktivierung der Modi „Assistent“ bzw. „Pilot“ in direkter (links) und indirekter Form (rechts) .....	129
Abbildung 54:	Mittlere Blickdauer [s] in Relation zur Nummer der einzelnen (links) und summierten Blicke (rechts) für die 1. Transition nach Versuchsbeginn mit Kontrollverschiebung auf „Assistent“ bzw. „Pilot“ .....	130
Abbildung 55:	Verständlichkeit des Systemvorschlags ( $M$ , $SD$ , links) und der Sicherheit bei der Systemaktivierung ( $M$ , $SD$ , rechts) in Abhängigkeit des „Grads der Kontrollverschiebung“ sowie der „Art der Transition“ .....	131
Abbildung 56:	Subjektiven Bewertungen ( $M$ ) der Modi „Assistent“ und „Pilot“ in der Abschlussbefragung der Realfahrtstudie.....	133
Abbildung 57:	Mittlere Übernahmedauer in s (links oben), wahrgenommene Schnelligkeit (rechts oben), subjektive Sicherheit (links unten) sowie Verständlichkeit (rechts unten) der Übernahme in Abhängigkeit des „Grads der Kontrollverschiebung“ und der „Art der Transition“ .....	137
Abbildung 58:	Mittlere Blickdauer [s] in Relation zur Nummer des Blickes für die direkten (links) und indirekten (rechts) Transitionen auf „Assistent“ bzw. „Pilot“ .....	140

Abbildung 59:	Gestaltungsempfehlungen für Transitionen in den betrachteten Übergabe- und Übernahme-situationen der ersten Studie in Form eines Zustandsdiagramms .....	143
Abbildung 60:	Automationsstufen und Systemmodi der zweiten Studie .....	151
Abbildung 61:	Transitionssituationen zwischen den Systemmodi der zweiten Studie ....	152
Abbildung 62:	Versuchsaufbau im Fahrsimulator der Volkswagen AG .....	154
Abbildung 63:	Erweiterungen im Simulatorraum (links) und im Steuerraum (rechts) .....	155
Abbildung 64:	Systemzustandsanzeigen der zweiten Studie .....	156
Abbildung 65:	Erfassungsbereich des umgesetzten ACC Sensors in der Fahrsimulation .....	158
Abbildung 66:	Schematische Darstellung des „Korridorsystems“ und des „Permanent-systems“ (links) mit Verlauf des Lenkmoments für das Korridorsystem (rechts) .....	159
Abbildung 67:	Fahrszenarien für Transitionen in Richtung Automation .....	161
Abbildung 68:	Sonderfahrszenario für Transitionen in Richtung Fahrer .....	161
Abbildung 69:	Fahrszenarien für Transitionen in Richtung Automation .....	162
Abbildung 70:	Versuchsplan der zweiten Studie, getrennt für die Richtung der Transition .....	164
Abbildung 71:	Übertragung Versuchsplan (Abbildung 70) in einen geeigneten Versuchsablauf .....	165
Abbildung 72:	Exemplarischer Ablauf der Versuchsfahrten für die Modusgruppe „ACC“ .....	166
Abbildung 73:	Verteilung des KUT-Gesamtwertes innerhalb der Stichprobe der zweiten Studie (links), inklusive 25 %, 50 %, 75 % Perzentile (rechts) ...	170
Abbildung 74:	Vorher- und Nachermessung auf den SOFI-Skalen „Schläfrigkeit“, Motivationsbereitschaft“ und „Allgemeine Erschöpfung“ .....	171
Abbildung 75:	Ausrichtung und Positionierung der vier Netzwerkkameras im Fahrsimulator .....	172
Abbildung 76:	EDA-Ableitorte an der Fußinnenseite A & B (links, Boucsein, 1992; modifiziert) und typischer Verlauf Hautleitfähigkeitsreaktion mit H = Amplitude, L = Latenzzeit, A = Anstiegszeit, G = Gipfelzeit, E = Erholungszeit (rechts, Schandry, 1998; modifiziert) .....	177
Abbildung 77:	Überblick über die ausgewerteten Daten der zweiten Studie .....	183
Abbildung 78:	Transitionen des ersten Ergebnisblocks in Richtung Automation .....	184
Abbildung 79:	Transitionen des zweiten Ergebnisblocks in Richtung Fahrer .....	185
Abbildung 80:	Mittlere ( $M$ , $SD$ ) Aktivierungsdauer (links, oben), subjektive Reaktions-schnelligkeit (rechts, oben), Verständlichkeit des Systemvorschlags (links, unten) und Nachvollziehbarkeit der Transition (rechts, unten) für Kontrollverschiebungen aus „FS“ in „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ .....	187
Abbildung 81:	Mittlere Herzrate ( $M$ , $SD$ ) für die Kontrollverschiebung auf „ACC“ (links, oben), „Assistent (rechts, oben) und „Pilot“ (links, unten) sowie für alle Grade der Kontrollverschiebung in der zweiten Versuchsfahrt mit erstmaligen Erleben eines höheren Automationsgrades (rechts, unten). ...	190
Abbildung 82:	Amplitude ( $M$ , $SD$ ; links) und Erholungszeit ( $M$ , $SD$ ; rechts) der Hautleit-fähigkeitsreaktion für die Kontrollverschiebungen in der zweiten Versuchsfahrt .....	192
Abbildung 83:	Verlauf der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen für die Kontrollverschie-bung „FS-Assistent“ (Zeitpunkt 0 = Systemangebot) über alle Fahrten ..	193
Abbildung 84:	Wechselwirkungsdiagramme zwischen „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Art der Transition“ für die Variablen „Subjektive Reaktionsschnellig-keit“ (links) und „Nachvollziehbarkeit der Transition“ (rechts) .....	196
Abbildung 85:	Wechselwirkungsdiagramme zwischen „Versuchsfahrt“ und „Art der Transition“ für die Variablen „Amplitudengröße“ (links) und „Erholungs-zeit“ (rechts) der Hautleitfähigkeitsreaktion .....	199
Abbildung 86:	Haupteffekt „Art der Transition“ für die Variablen „Latenzzeit“ (links) und „Gipfelzeit“ (rechts) der Hautleitfähigkeitsreaktion .....	199

Abbildung 87:	Wechselwirkungsdiagramme zwischen „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Art der Transition“ für die Variablen „Blickdauer (1. Blick; links)“ und Gesamtblickdauer (rechts) .....	200
Abbildung 88:	Verlauf der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen für die indirekte Transition auf den Systemmodus „Assistent“ (Zeitpunkt 0 = Systemangebot).....	201
Abbildung 89:	Fehlerbalkendiagramm (links) und Streudiagramm (rechts) für die mittlere Aktivierungsdauer [s] für Transitionen auf den Modus „Pilot“ aus „Fahrer selbst“ bzw. „Assistent“ .....	204
Abbildung 90:	Wahrgenommene Reaktionsschnelligkeit (links) und Nachvollziehbarkeit der Transition (rechts) für Übergänge auf den Modus „Pilot“ aus „Fahrer selbst“ und „Assistent“ .....	205
Abbildung 91:	Subjektive Bewertungen der Modi „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ (Mittelwert) .....	205
Abbildung 92:	Amplitudengröße (M, SD; links) und Erholungszeit (M, SD; rechts) der Hautleitfähigkeitsreaktion für Transitionen auf den Modus „Pilot“ aus „Fahrer selbst“ bzw. „Assistent“ .....	207
Abbildung 93:	Verlauf der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen für Kontrollverschiebungen aus „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ auf „Fahrer selbst“ (FS) .....	213
Abbildung 94:	Erholungszeit (M, SD; links) und Amplitudengröße (M, SD; rechts) der Hautleitfähigkeitsreaktion für Kontrollverschiebungen aus „ACC“, „Assistent“ und „Pilot“ auf „Fahrer selbst“ .....	214
Abbildung 95:	Wechselwirkungsdiagramm zwischen „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Art der Transition“ für die Variablen „Übernahmedauer“ (links) und „Nachvollziehbarkeit der Transition“ (rechts).....	217
Abbildung 96:	Wahrgenommene Desorientierung (M, SD) in Abhängigkeit der „Art der Transition“ und des „Grads der Kontrollverschiebung“ (links) sowie Bewertung der Option (M, SD) einer ACC-Aktivierung nach vorausgehender Kontrollabgabe aus „Assistent bzw. „Pilot“ auf „Fahrer selbst“ ....	218
Abbildung 97:	Wechselwirkungsdiagramme zwischen „Grad der Kontrollverschiebung“ und „Art der Transition“ für die Variablen „Blickdauer (1. Blick; links)“ und Gesamtblickdauer (rechts) .....	219
Abbildung 98:	Verlauf der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen für die Transition „Pilot-Assistent“ (Zeitpunkt 0 = Übernahmeaufforderung) über alle Versuchsfahrten hinweg .....	221
Abbildung 99:	Verlauf der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen für die Transition „FS-Assistent“ (Zeitpunkt 0 = Systemangebot) nach vorheriger Kontrollrückgabe aus „Pilot“ .....	222
Abbildung 100:	Nachvollziehbarkeit der Transition (M, SD, links) und wahrgenommene Desorientierung (M, SD, rechts) für Übergänge aus „Pilot“ in „Fahrer selbst“ und „Assistent“ .....	223
Abbildung 101:	Dauer 1. Blick auf die Systemzustandsanzeige (M, SD) für Übergänge aus „Pilot“ in „Assistent bzw. „FS“ (links) und Häufigkeit der Blicke für „Pilot-Assistent“ in Abhängigkeit zur Gesamtblickdauer (rechts).....	224
Abbildung 102:	Gestaltungsempfehlungen für die betrachteten Übergabe- und Übernahme-situationen der zweiten Studie in Form eines Zustandsdiagramms .....	229
Abbildung 103:	Zustandsdiagramme mit Empfehlungen für die Gestaltung der Übergabe- und Übernahme-situationen innerhalb des betrachteten, vierstufigen Automationsansatzes .....	252

12     Anhang

